

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. GALLERIE

PROGETTO PRELIMINARE

NUOVA LINEA AV/AC VENEZIA - TRIESTE
TRATTA RONCHI - TRIESTE

RELAZIONE DI ELABORAZIONE E PRESENTAZIONE DATI

RILIEVO SATELLITARE
VERSANTE COSTIERO TRA S.CROCE E TRIESTE

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.

L 3 4 4 0 0 R 0 7 RH GN0000 0 0 1 A

Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
1	EMISSIONE FINALE	T.R.E. <i>Micrografico</i>	23.09.10	F. Iannotta <i>F. Iannotta</i>	gg mm.aa	D. Fochesato <i>D. Fochesato</i>	gg mm.aa	A. Pigorini <i>A. Pigorini</i>	gg mm.aa

ITALFERR S.p.A.
Uffici Centrali - Roma
Dott. Ing. A. PIGORINI
Ordine Ingeg. 100/10000

File: L34400R07RHGN0000001A.doc

n. Elab.: 131



Progetto cofinanziato
dalla Unione Europea

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	2 di 79

INDICE

1	PREMESSA	4
2	SCOPO DEL DOCUMENTO	4
3	ALLEGATI	6
4	RISULTATI DELL'ANALISI SATELLITARE	6
4.1	AREA DI INTERESSE	6
4.2	SCELTA DEL PUNTO DI RIFERIMENTO.....	8
4.3	RISULTATI DELL'ANALISI PSINSAR™	9
4.3.1	<i>Campo di velocità.....</i>	12
4.3.2	<i>Dettaglio 1- Progressiva relativa 1+400</i>	17
4.3.3	<i>Dettaglio 2 –Progressiva relativa 5+050.....</i>	23
4.3.4	<i>Dettaglio 3 - Progressiva relativa 8+050</i>	30
4.3.5	<i>Dettaglio 4 – Progressiva relativa 9+550.....</i>	37
4.3.6	<i>Serie storiche di spostamento.....</i>	42
4.3.7	<i>Quota ellissoidica dei PS.....</i>	44
4.4	NOTE PER L'INTERPRETAZIONE DEI DATI E SVILUPPI FUTURI	47
5	RAPPORTO TECNICO SULL'ANALISI CONDOTTA	48
5.1	INTRODUZIONE	48
5.2	METODOLOGIA	48
5.3	SELEZIONE DEI DATI.....	50
5.4	SELEZIONE DELL'IMMAGINE MASTER.....	51
5.5	MAPPE DI RIFLETTIVITÀ DELL'AREA DI INTERESSE	52
5.6	ANALISI INTERFEROMETRICA	55

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	3 di 79

5.7	LA TECNICA PSINSAR™	55
5.8	ANALISI SQUEESAR™	56
6	DATI ANCILLARI ALL'ELABORAZIONE	58
6.1	DATASET ERS 1992-2000 - TRACK: 351	58
6.1.1	<i>Geometria di acquisizione</i>	63
6.2	DATASET RADARSAT 2003-2009 - TRACK: 254	65
6.2.1	<i>Geometria di acquisizione</i>	71
7	CONCLUSIONI	73
	ALLEGATO 1: BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI ALLA TECNICA PSINSAR™	74

	LINEA AV/AC PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste					
TITOLO ELABORATO	COMMESSA L344	LOTTO 00	CODIFICA R 07 RH	DOCUMENTO GN 00 00 001	REV. A	FOGLIO 4 di 79

1 PREMESSA

Nell'ambito dello sviluppo della progettazione preliminare della linea AV Venezia-Trieste tratta Ronchi-Trieste, Italferr ha commissionato alla società Tele-Rilevamento Europa - T.R.E. s.r.l. lo studio dei movimenti superficiali mediante tecnica radar satellitare (PSI) dei terreni della fascia costiera compresi tra S.Croce e Trieste.

Si fa presente che nella redazione del presente documento si è fatto riferimento ad una progressivazione relativa del tracciato di progetto; la progressiva iniziale 0+000, posta ad Aurisina, corrisponde alla progressiva 23+477 dell'effettivo tracciato di progetto.

2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Obiettivo del presente progetto è lo studio di fenomeni di deformazione superficiale utilizzando dati radar satellitari elaborati con tecnica PSInSARTM, relativi a un tratto del Progetto Preliminare della nuova linea Ronchi-Trieste. L'area di studio, dell'estensione di circa 10 km lineari, si sviluppa sul versante costiero dalla Progressiva relativa 0 (p.k. 23+477 del tracciato di progetto) alla Progressiva relativa 10 (p.k. 33+477 del tracciato di progetto) (Figura 1).

Scopo dello studio è la stima degli spostamenti superficiali avvenuti nell'area di interesse nel periodo compreso tra il 1992 ed il 2009. La tecnica PSInSARTM si rivela particolarmente adatta allo scopo perché consente di recuperare informazioni storiche relative a punti di misura già presenti al suolo e visibili da satellite (definiti Permanent Scatterers) e di essi stimare l'evoluzione dei movimenti nel tempo (serie storica e velocità media di spostamento). Non è richiesta la materializzazione di alcun elemento al suolo.

I Permanent Scatterers (PS) in generale corrispondono a parti di edifici, antenne, manufatti artificiali o rocce esposte e per ciascuno di essi è possibile misurare, nell'intero arco temporale di osservazione, gli spostamenti relativi rispetto ad un punto di riferimento assunto stabile (misure differenziali). Per ciascun punto sono calcolate le serie storiche e le velocità medie annue di spostamento.

Nel presente progetto sono stati utilizzati:

- per il periodo 1992-2000 i dati radar dei sensori ERS-1 e ERS-2 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA)
- per il periodo 2003-2009 i dati radar del sensore RADARSAT-1 dell'Agenzia Spaziale Canadese (CSA)

Per entrambi i periodi le immagini radar sono acquisite in geometria Discendente (orbita del satellite da Nord verso Sud).

	LINEA AV/AC PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste					
TITOLO ELABORATO	COMMESSA L344	LOTTO 00	CODIFICA R 07 RH	DOCUMENTO GN 00 00 001	REV. A	FOGLIO 5 di 79

Ogni misura di spostamento di PS è monodimensionale ed è da intendersi lungo la direzione sensore-bersaglio (LOS – Line Of Sight), inclinata rispetto alla verticale di un angolo variabile a seconda del satellite utilizzato (per i satelliti ERS risulta circa 23° per il RADARSAT circa 35°).

L'analisi condotta è di tipo “**Linear PSInSAR™**”, ovvero un'indagine di dettaglio lungo tutto lo sviluppo della struttura da studiare, in questo caso lungo **il tracciato di progetto**. Per questo tipo di analisi si forniscono le informazioni di velocità per una fascia di terreno larga 2.000 metri dalla linea di costa, nonché le informazioni di dettaglio (le serie storiche dei punti) per una fascia ridotta di 1000 metri (± 500) nell'intorno del tracciato.

L'elaborazione nel suo complesso è stata condotta con **157 immagini satellitari** ed ha consentito di individuare oltre **65.000 PS** per ciascuno dei quali sono state calcolate posizione, velocità media annua e quota. Per circa **30.000** punti nelle immediate vicinanze del tracciato di progetto sono state inoltre calcolate le serie storiche di spostamento.

L'analisi effettuata ha prodotto un'ottima copertura di PS sull'area investigata, ad eccezione di alcune circoscritte aree vegetate dove la mancanza di riflettori visibili al satellite non consente di effettuare alcuna misura.

L'analisi degli spostamenti PS rilevati sia dai dati storici (1992 -2000) che da quelli aggiornati (2003-2009) ha fornito le seguenti indicazioni:

- le velocità di spostamento evidenziano una sostanziale **stabilità lungo tutto il tracciato di progetto** ad eccezione di alcune singolarità da studiare nel dettaglio (cfr. 4.3.2-4.3.5);
- Da un primo confronto tra le misure di spostamento e il catalogo frane della regione Friuli Venezia Giulia si è osservato che alcuni fenomeni risultavano attivi nel periodo 1992-2000 e altri nel periodo 2003-2009. Tali fenomeni sono concentrati lungo la fascia costiera a distanza di diverse centinaia di metri dalla linea di progetto;
- Il catalogo frane disponibile on-line fornisce solo indicazioni generali sull'estensione areale dei fenomeni e sulla loro tipologia: la disponibilità di informazioni inedite (PS) sul grado di attività dei fenomeni franosi presenti nell'area consente di integrare le conoscenze disponibili.

Si ricorda che le velocità medie annue non sono esaustive per l'analisi dei dati PS: lo studio delle serie storiche di spostamento, confrontate con i relativi valori di deviazione standard, è indispensabile per una corretta interpretazione delle misure.

	LINEA AV/AC PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste					
TITOLO ELABORATO	COMMESSA L344	LOTTO 00	CODIFICA R 07 RH	DOCUMENTO GN 00 00 001	REV. A	FOGLIO 6 di 79

In generale i risultati dell'analisi PSInSARTM mostrano una complementarità con le misure topografiche tradizionali a terra, aumentando la densità dei punti di misura e fornendo informazioni sui movimenti storici. Una peculiarità delle tecniche di telerilevamento inoltre è quella di offrire una visione sinottica dei fenomeni in atto fornendo misure omogenee su vaste aree: è così possibile evidenziare la presenza di movimenti anche su strutture esterne al tracciato ma ad esso correlate e quindi potenzialmente sensibili.

Per il presente progetto, al fine di massimizzare il numero di punti di misura disponibili, si è deciso di utilizzare in fase di processing l'ultimo avanzamento dell'algoritmo PS, denominato **SqueeSARTM**, disponibile sul mercato a partire da Gennaio 2010. Ai Permanent Scatterer l'algoritmo affianca i cosiddetti Distributed Scatterer (DS), punti di misura radar che possono essere utilizzati con successo solo dopo un complesso algoritmo di identificazione e stima, oggetto di brevetto (cfr 5.8). Nel seguito del documento si farà riferimento in maniera indistinta ai 'PS-punti di misura' intendendo entrambe le famiglie di punti (PS +DS).

3 ALLEGATI

Il documento è corredato dai seguenti allegati:

- All. [1] [Bibliografia e riferimenti alla tecnica PSInSARTM];
- All. [2] [Manuale della Tecnica PSInSARTM];

4 RISULTATI DELL'ANALISI SATELLITARE

Il presente progetto riguarda l'elaborazione con Tecnica PSInSARTM, e suo ultimo aggiornamento SqueeSARTM, di dati radar satellitari di tipo SAR acquisiti nell'area indicata in Figura 1 lungo un tratto del tracciato di progetto della nuova linea AV/AC Venezia – Trieste, versante costiero tra S.Croce e Trieste. Il fine è quello di individuare dei bersagli radar per i quali è possibile stimare gli spostamenti avvenuti nel periodo di osservazione (1992-2009) e grazie ad essi misurare fenomeni di deformazione che possono interferire con la struttura in esame, quali frane, subsidenze, faglie sismiche.

L'area di interesse è stata analizzata con due dataset distinti di immagini satellitari: dati ERS, acquisiti nel periodo 1992-2000, e dati Radarsat acquisiti nel 2003-2009. I due dataset sono indipendenti, vengono elaborati separatamente e sono entrambi acquisiti nella stessa geometria del satellite da Nord verso Sud (Discendente).

4.1 Area di Interesse

L'area analizzata ha estensione pari a 10 km lineari e segue il tracciato del progetto per un corridoio di 2 km di larghezza dalla costa. È in gran parte contenuta nel comune di Trieste e nella sua parte settentrionale attraversa il comune di Duino Aurisina. In Figura 1 è rappresentata l'ubicazione dell'area su base cartografica Virtual

Earth©2009 Microsoft Corporation, mentre per l'allineamento dei risultati PS e la visualizzazione in ambiente GIS è stata utilizzata la cartografia fornita dal cliente (CTR Regione Friuli Venezia Giulia in formato .DWG).



Figura 1: Linea AV/AC Venezia – Trieste: area di studio. In figura è riportato il tracciato di progetto. Ortofoto di sfondo Virtual Earth (c)2009 Microsoft Corporation.

	LINEA AV/AC PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste												
TITOLO ELABORATO	<table border="1"> <tr> <td>COMMESSA</td> <td>LOTTO</td> <td>CODIFICA</td> <td>DOCUMENTO</td> <td>REV.</td> <td>FOGLIO</td> </tr> <tr> <td>L344</td> <td>00</td> <td>R 07 RH</td> <td>GN 00 00 001</td> <td>A</td> <td>8 di 79</td> </tr> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	8 di 79
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	8 di 79								

4.2 Scelta del punto di riferimento

I punti di riferimento delle due analisi ERS e Radarsat sono stati scelti in prossimità dell'abitato di Prosecco, a una distanza di circa 500 m dal tracciato AV, considerando i migliori PS tra quelli presenti in termini di caratteristiche radiometriche e stabilità del segnale di fase. Essi sono ubicati in posizioni sufficientemente vicine da rendere confrontabili i risultati ottenuti nelle due elaborazioni (a meno della differenza temporale dei due dataset).

Nelle tabella seguente sono riportate le coordinate dei punti di riferimento scelti e in Figura 2 la loro posizione.

ELABORAZIONE	Coordinate Punto di Riferimento
TRIESTE ERS 1992-2000	NORD: 5.062.399 m EST: 2.421.324 m
TRIESTE RSAT 2003-2009	NORD: 5.062.313 m EST: 2.421.359 m

Tabella 1: Coordinate dei punti di riferimento scelti per le due elaborazioni, sistema di riferimento Gauss Boaga Est (ESRI: Monte Mario Italy 2).

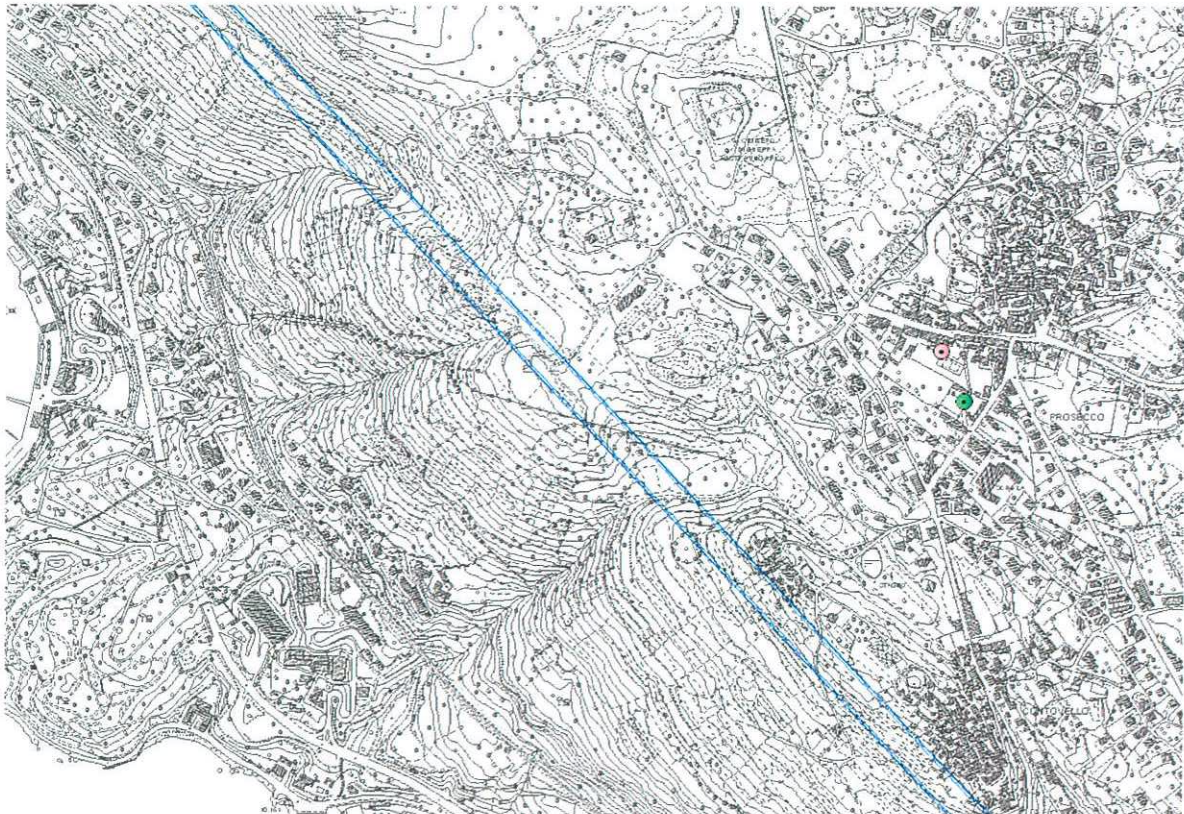


Figura 2: Posizione dei punti di riferimento (REF) utilizzati per l'elaborazione ERS (rosa) e Radarsat (verde).

4.3 Risultati dell'analisi PSInSAR™

Lo studio ha prodotto un'ottima copertura di punti di misura sull'area investigata: su oltre 24 kmq sono stati individuati **65.658 PS**, utilizzando l'analisi di **157** immagini radar. Per ciascun punto viene fornita la **velocità media annua** di deformazione e la **quota**, nell'area più in prossimità del tracciato (un corridoio di larghezza 500 m) anche le **serie storiche** di deformazione.

Il dato PS è stato georeferenziato e allineato su cartografia .DWG nel sistema di proiezione Gauss Boaga Fuso EST (GBE - MonteMario Italy 2).

I risultati delle elaborazioni sono contenuti negli shape file di seguito elencati e facilmente importabili in ambiente GIS.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	10 di 79

Elaborazione	Shape File consegnati
TRIESTE ERS 1992-2000	<p>TRIESTE_ERS_D_T351_2673_ITALFERR_GBE-TSR.shp</p> <p>TRIESTE_ERS_D_T351_2673_ITALFERR_GBE-REF.shp</p> <p>TRIESTE_ERS_D_T351_2673_ITALFERR_GBE-MET.shp</p>
TRIESTE RSAT 2003-2009	<p>TRIESTE_RSAT_S3_D_T254_ITALFERR_GBE-TSR.shp</p> <p>TRIESTE_RSAT_S3_D_T254_ITALFERR_GBE-REF.shp</p> <p>TRIESTE_RSAT_S3_D_T254_ITALFERR_GBE-MET.shp</p>

Tabella 2: Elenco dei risultati consegnati.

I file consegnati sono file tabellari che per ogni punto di misura forniscono le seguenti informazioni:

- *code* (codice identificativo)
- *vel* (velocità media annua di spostamento)
- *v_stdev* (deviazione standard della velocità)
- *height* (quota del punto rispetto all'ellissoide di riferimento)
- *h_stdev* (deviazione standard della quota)
- *ts* (serie storica di spostamento)
- *coherence* (parametro di qualità)
- *EFF_AREA* (tipologia punto di misura: 0 = PS, > 0 = DS)

TITOLO ELABORATO

COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO
L344 00 R 07 RH GN 00 00 001 A 11 di 79

FID	Shapse	CODE	HEIGHT	H STDEV	VEL	V STDEV	CONERGENCE	FFF AREA	D19920908	D19921013	D19920126	D19930302	D19930406	D19930511	D1993
0	Point	AD1SW	51,83	0,7	0,17	0,4	0,8	1	0	-5,87	-8,81	-9,11	-6,42	0,08	
1	Point	AD1SB	56,1	0,65	-1,31	0,4	0,88	1	0	3,16	5,03	-0,84	3,81	1,77	
2	Point	AD1TC	73,19	0,7	-1,25	0,41	0,81	0	0	-1,22	-3,13	-7,05	-2,3	-2,94	
3	Point	AD1TO	89,05	0,67	-3,84	0,41	0,75	0	0	-7,14	-4,26	-10,66	-6,74	0,43	
4	Point	AD1TI	88,05	0,68	-3,30	0,4	0,84	0	0	-4,97	-3,96	-8,72	-0,58	2,04	
5	Point	AD1TN	79,51	0,7	-5,31	0,39	0,77	0	0	1,9	6,06	1,84	7,08	1,28	
6	Point	AD1TQ	83,68	0,69	-5,64	0,39	0,88	0	0	1,3	1,53	-4,84	3,07	-3,18	
7	Point	AD1TR	96,76	0,64	-5,18	0,38	0,89	1	0	-7,03	-4,21	-7,5	-2,67	-4,23	
8	Point	AD1TS	86,05	0,8	-6,37	0,48	0,63	0	0	-2,24	-5,82	-13,13	-9,32	-5,03	
9	Point	AD1TV	51,97	0,62	-1,03	0,37	0,91	1	0	6,15	3,87	3,84	7,27	5,62	
10	Point	AD1TW	114,74	0,66	-5,04	0,39	0,75	0	0	-9	-7,72	-11,09	-4,02	2,68	
11	Point	AD1TX	92,27	0,62	-4,49	0,37	0,8	0	0	-7,14	-3,69	-5,36	-0,67	-4,41	
12	Point	AD1TY	66,14	0,61	-5,43	0,36	0,91	1	0	-7,25	-4,5	-7,66	-4,42	-6,67	
13	Point	AD1TZ	82,93	0,64	-5,52	0,39	0,87	1	0	-6,54	-2,2	-4,66	2,5	-6,33	
14	Point	AD1T3	107,77	0,67	-3,25	0,41	0,79	0	0	8,98	11,62	5,18	10,19	11,83	
15	Point	AD1T6	129,83	0,64	-3,14	0,43	0,83	1	0	-7,3	-2,95	-2,21	-0,1	-1,84	
16	Point	AD1T7	111,79	0,61	-4,12	0,39	0,88	0	0	-2,99	-1,23	-4,89	-1,22	-2,55	
17	Point	AD1UA	133,22	0,74	-3,48	0,41	0,69	0	0	-6,15	-0,7	2,26	2,8	-3,98	
18	Point	AD1UB	114,06	0,71	0,28	0,43	0,74	0	0	-3,78	-1,27	2,86	6,38	3,57	
19	Point	AD1UC	50,68	0,69	-1,27	0,44	0,66	0	0	-18,3	-18,68	-8,27	-19,59	-7,66	
20	Point	AD1UE	93,48	0,61	-4,35	0,36	0,75	0	0	-8,97	-5,62	-5,19	-0,8	-5,19	
21	Point	AD1UF	81,19	0,72	-5,32	0,42	0,73	0	0	-11,63	-5,78	-7,84	-6,56	-6,43	
22	Point	AD1U	139,26	0,77	-2,96	0,45	0,69	0	0	4,39	9,53	10,92	14,82	10,95	
23	Point	AD1UJ	117,06	0,68	-2,27	0,41	0,75	1	0	4,68	7,63	9,31	9,21	2,38	
24	Point	AD1UK	98,09	0,64	-4,46	0,37	0,91	0	0	-4,98	-1,35	-2,77	0,18	-2,82	
25	Point	AD1UN	134,22	0,64	-6,01	0,42	0,77	1	0	-3,24	-2,17	-0,91	0,71	-2,28	

Figura 3: esempio di file di metadati associati ai punti di misura (formato .dbf)

Occorre sempre tenere in considerazione due aspetti importanti che riguardano tutte le **misure** di spostamento fornite:

1. sono rilevate **lungo la linea di vista del sensore** (ossia, la congiungente sensore-bersaglio o *Line Of Sight, LOS*)
2. sono di tipo **differenziale**, ovvero riferite spazialmente ad un punto a terra, di coordinate note, preso come riferimento (*reference point, REF*); le informazioni di movimento fornite dai PS sono pertanto relative e non assolute.

Questi elementi sono da tenere in particolare considerazione per una corretta interpretazione dei risultati.

Nel capitolo 6 sono elencati per ogni sito i versori e gli angoli di *LOS*, oltre ai dati ancillari dell'elaborazione.

L'analisi effettuata sulla tratta Trieste – Ronchi evidenzia un'ottima copertura di punti di misura sull'area in esame, analoga a standard raggiunti per elaborazioni dello stesso tipo.

La mancanza di PS in alcune zone trova una spiegazione nell'uso del suolo particolarmente vegetato o intensamente coltivato, dove non sono presenti bersagli naturali riflettenti al satellite (cfr. paragrafo 3.1.1 *Manuale della Tecnica PSInSAR™*).

Rispetto al punto di riferimento considerato i risultati indicano:

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	12 di 79

- una sostanziale **stabilità lungo tutto il tracciato di progetto** ad eccezione di alcune singolarità da studiare nel dettaglio (cfr. 4.3.2-4.3.5);
- Da un primo confronto tra le misure di spostamento e il catalogo frane della regione FVG si è osservato che alcuni fenomeni risultavano attivi nel periodo 1992-2000 e altri nel periodo 2003-2009. Tali fenomeni sono concentrati lungo la fascia costiera a distanza dalla linea Trieste-Ronchi;
- Il catalogo frane disponibile on line fornisce solo indicazioni generali sull'estensione areale dei fenomeni e sulla loro tipologia: la disponibilità di informazioni inedite (PS) sul grado di attività dei fenomeni franosi presenti nell'area consente di integrare le conoscenze disponibili.

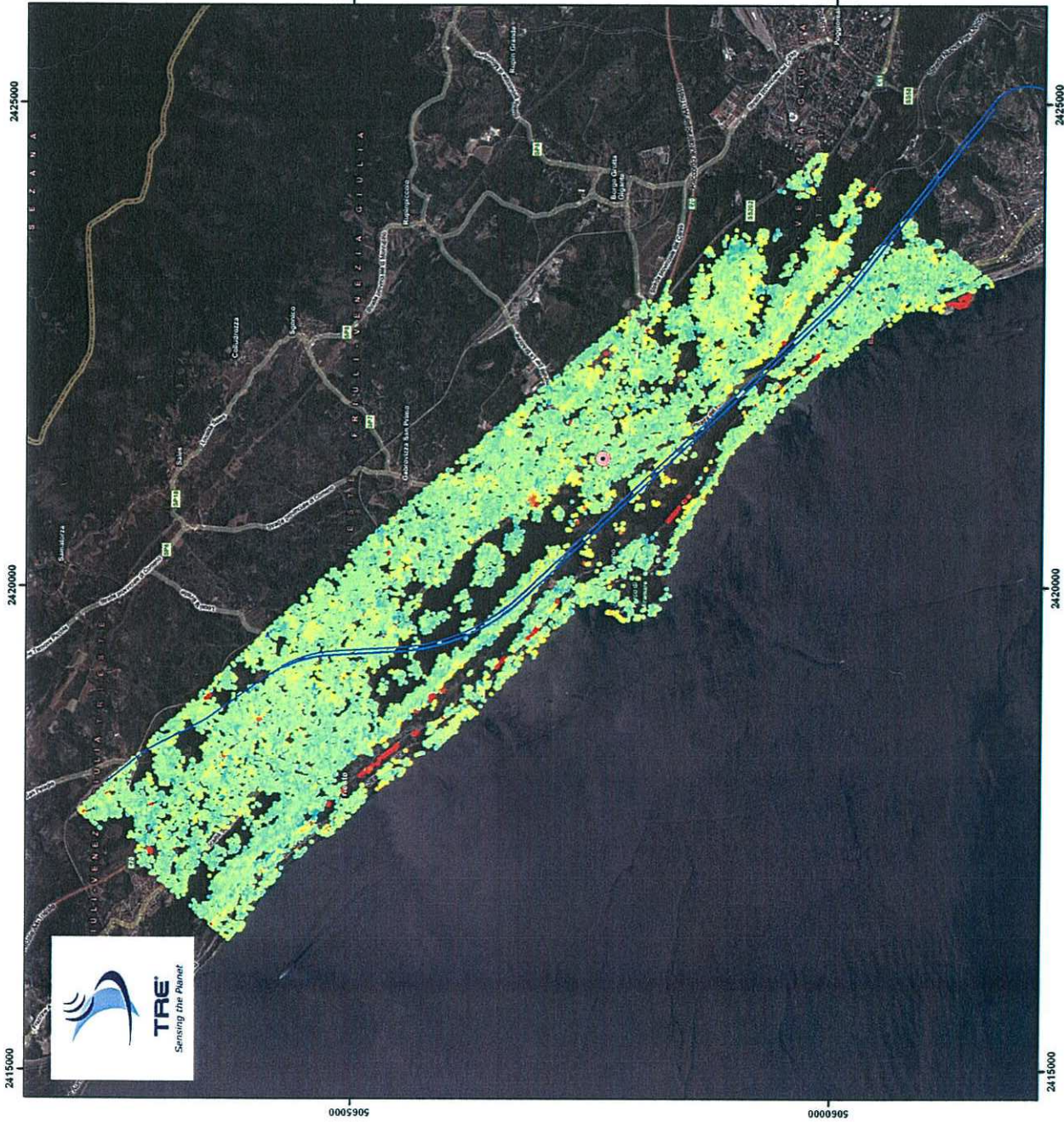
Si ricorda che le velocità medie annue non sono esaustive per l'analisi dei dati PS: lo studio delle serie storiche di spostamento, confrontate con i relativi valori di deviazione standard, è indispensabile per una corretta interpretazione delle misure.

4.3.1 Campo di velocità

Nelle figure seguenti vengono presentati i campi delle velocità medie annue di spostamento dei PS in [mm/anno] stimate sull'area di interesse nelle due elaborazioni.

La scala colori utilizzata per visualizzare le velocità identifica con i colori giallo, arancione e rosso **allontanamenti dal sensore lungo la direzione di LOS**, con il verde punti sostanzialmente stabili (valori di velocità compresi tra -1 e 1 mm/anno) e con varie tonalità di blu gli **avvicinamenti al sensore sempre lungo la direzione sensore-bersaglio**.

Le specifiche degli angoli di vista del satellite sono riportati in figura. Seguono le deviazioni standard relative a ciascuna elaborazione.



**NUOVA LINEA AV/AC VENEZIA-TRIESTE
TRATTA RONCHI-TRIESTE**
**Analisi delle deformazioni superficiali
con Tecnica SqueeSAR™**

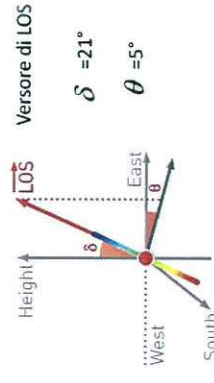


DATI DI ELABORAZIONE

Satellite	ERS1-ERS2
Geometria	Discendente
Track	351
Numero Immagini Elaborate	72
Intervallo di osservazione	Aprile 1992 - Dicembre 2000

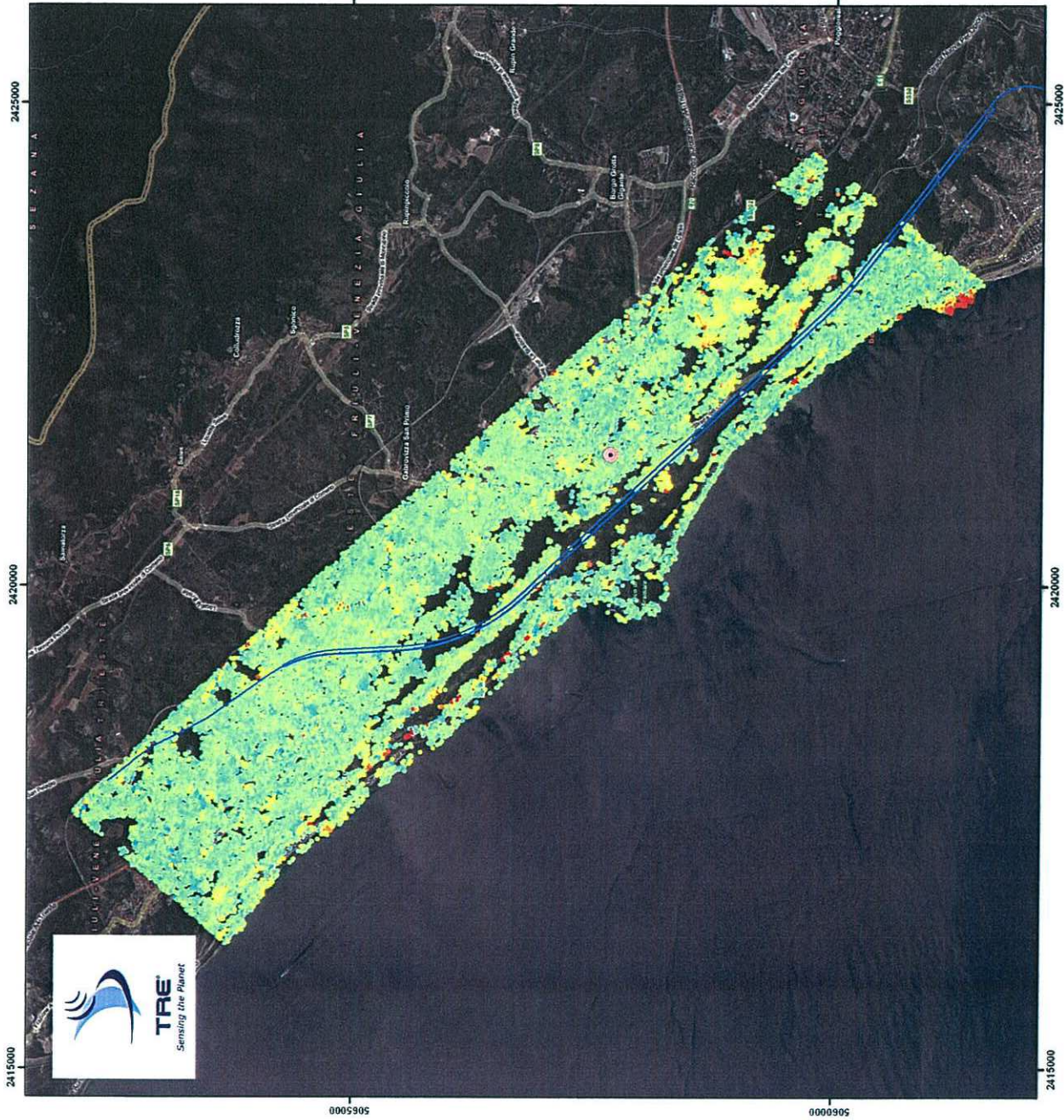
LEGENDA

- LINEA AV/AC Ronchi-Trieste
- Punto di riferimento
- Velocità media annua lungo la direzione di vista del satellite (LOS):



Supporto cartografico: Virtual Earth © Microsoft Corporation
Map Projection: Transverse Mercator, Datum Monte Mario, Fuso 2
© Tele-Rilevamento Europa 2010

Figura 4: Analisi Storica 1992-2000: velocità media annua, elaborazione ERS Descendente.



**NUOVA LINEA AV/AC VENEZIA-TRIESTE
TRATTA RONCHI-TRIESTE**

**Analisi delle deformazioni superficiali
con Tecnica SqueeSAR™**

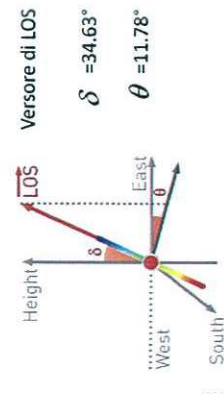


DATI DI ELABORAZIONE

Satellite	RSAT-1
Geometria	Discendente
Track	254
Numero immagini Elaborate	85
Intervallo di osservazione	Marzo 2003- Agosto 2009

LEGENDA

- LINEA AV/AC Ronchi-Trieste
 - Punto di riferimento
- Velocità media annua lungo
la direzione di vista del satellite (LOS):



Supporto cartografico: Virtual Earth © Microsoft Corporation
Map Projection: Transverse Mercator, Datum Monte Mario, Fuso 2
© Tele-Rilevamento Europa 2010

Figura 5: Analisi 2003-2009: velocità media annua, elaborazione Radarsat Discendente.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	15 di 79

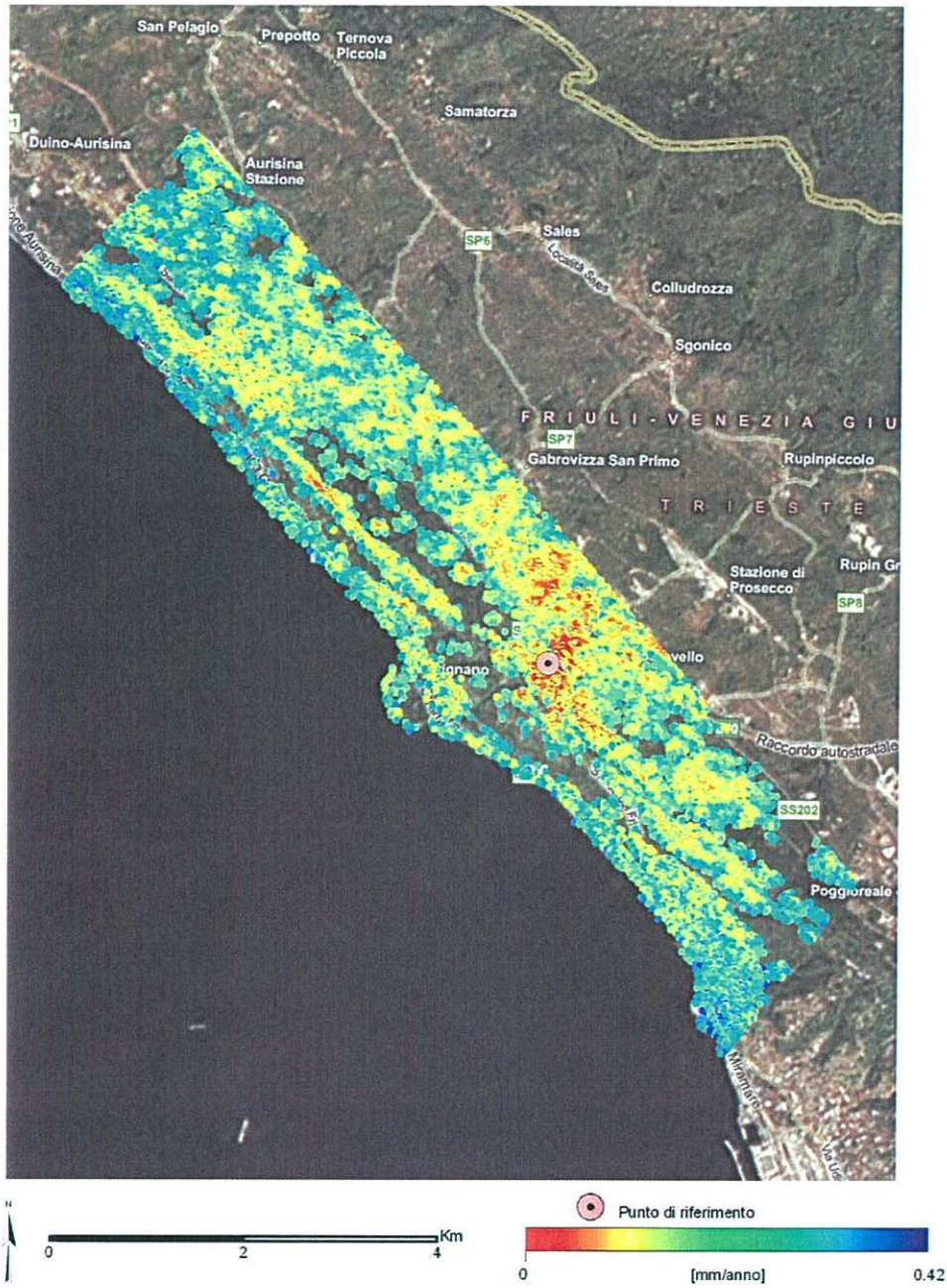


Figura 6: Deviazioni standard delle velocità dei PS ottenuti dall'elaborazione ERS 1992-2000.

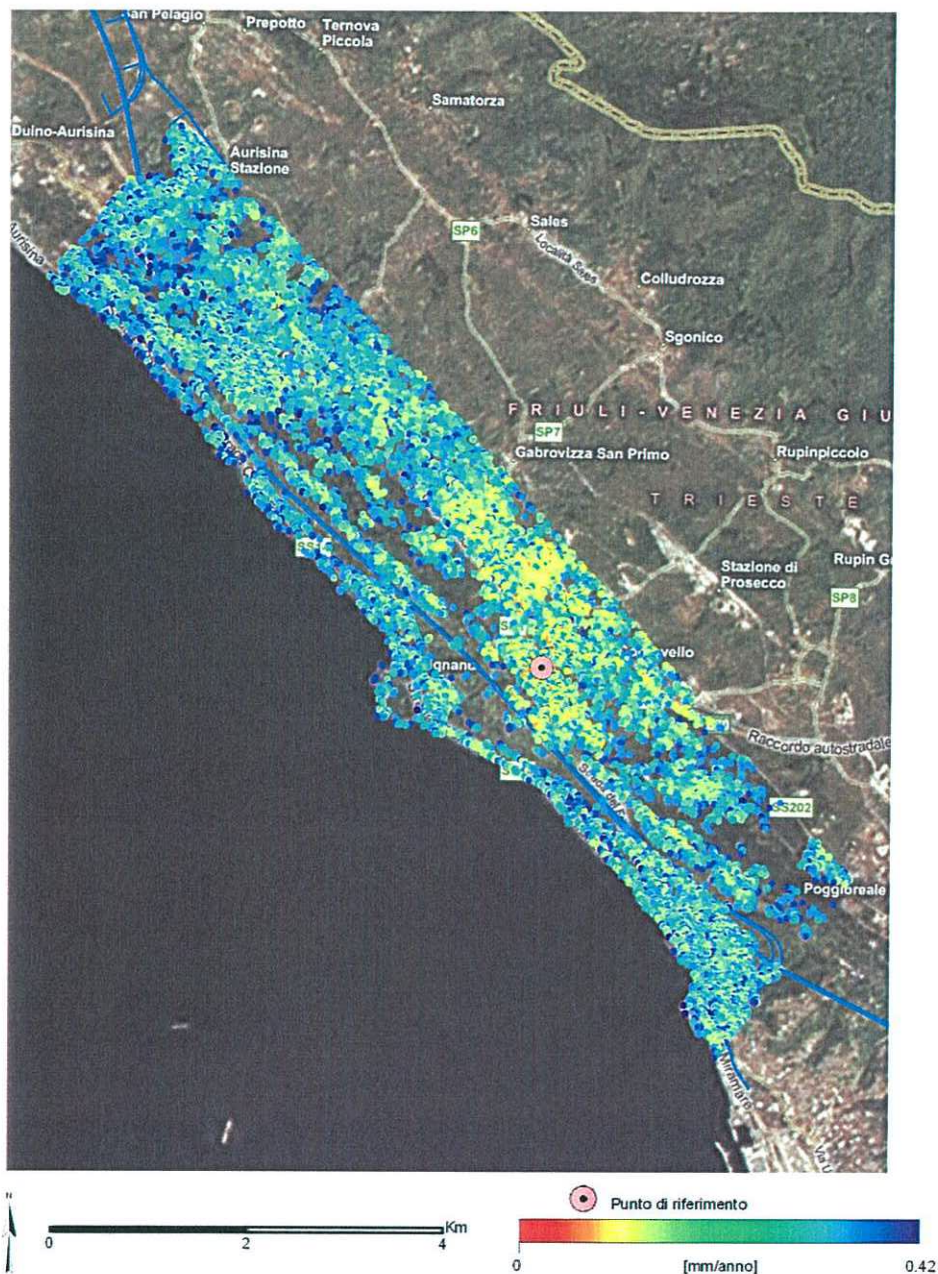


Figura 7: Deviazioni standard delle velocità dei PS ottenuti dall'elaborazione Radarsat 2003-2009.

A titolo di esempio nei paragrafi a seguire sono presentate delle aree di dettaglio scelte sul tracciato di progetto (cfr. Figura 8).



Figura 8: Aree di dettaglio.

4.3.2 Dettaglio 1- Progressiva relativa 1+400

In Figura 9 è rappresentato un tratto della linea Trieste-Ronchi in prossimità della Progressiva relativa 1+400. Nell'area l'analisi satellitare non evidenzia movimenti di rilievo lungo il tracciato di progetto, come indicato nelle Figura 10 e Figura 12. Gli unici spostamenti rilevati dai PS sono in corrispondenza di una linea ferroviaria esistente posta a circa 300 m a nord-ovest del tracciato (Es: punti di misura BAHLE e BEKXL). I trend delle serie storiche risultano in alcuni casi lineari sull'intero arco temporale analizzato e in altri casi con leggere accelerazioni.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	18 di 79

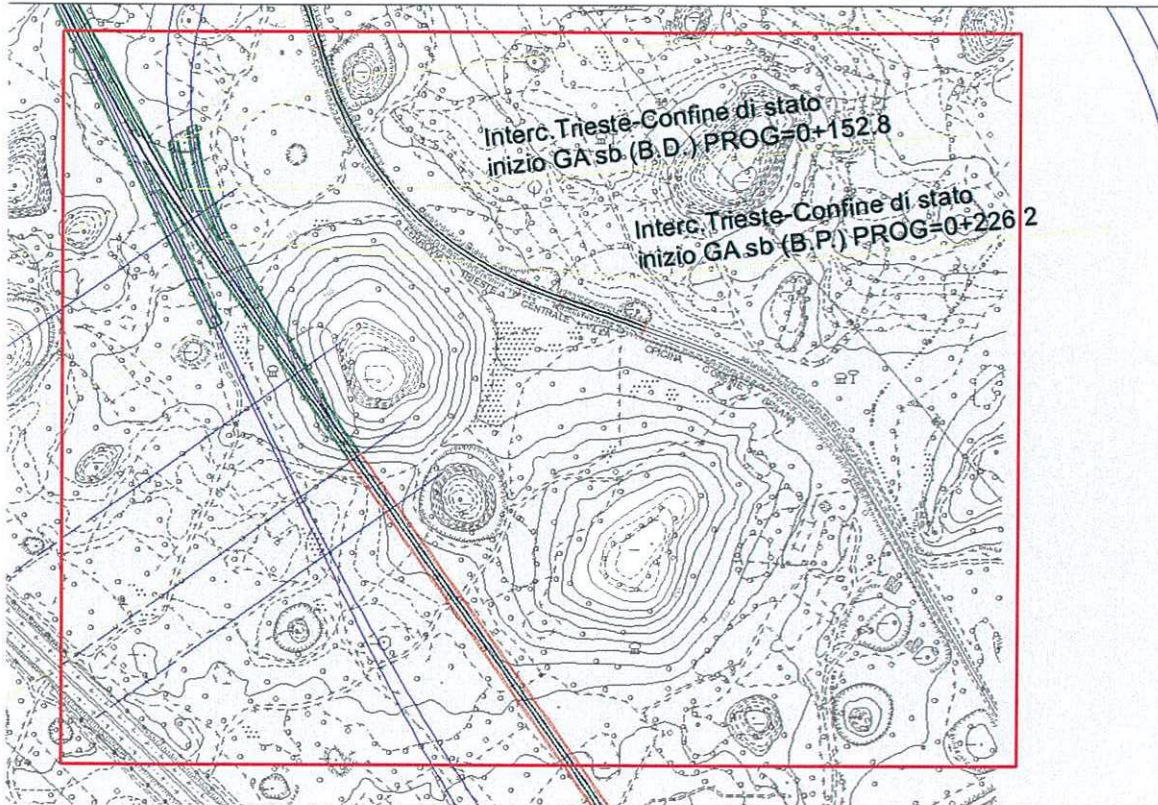


Figura 9: Dettaglio 1.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	19 di 79

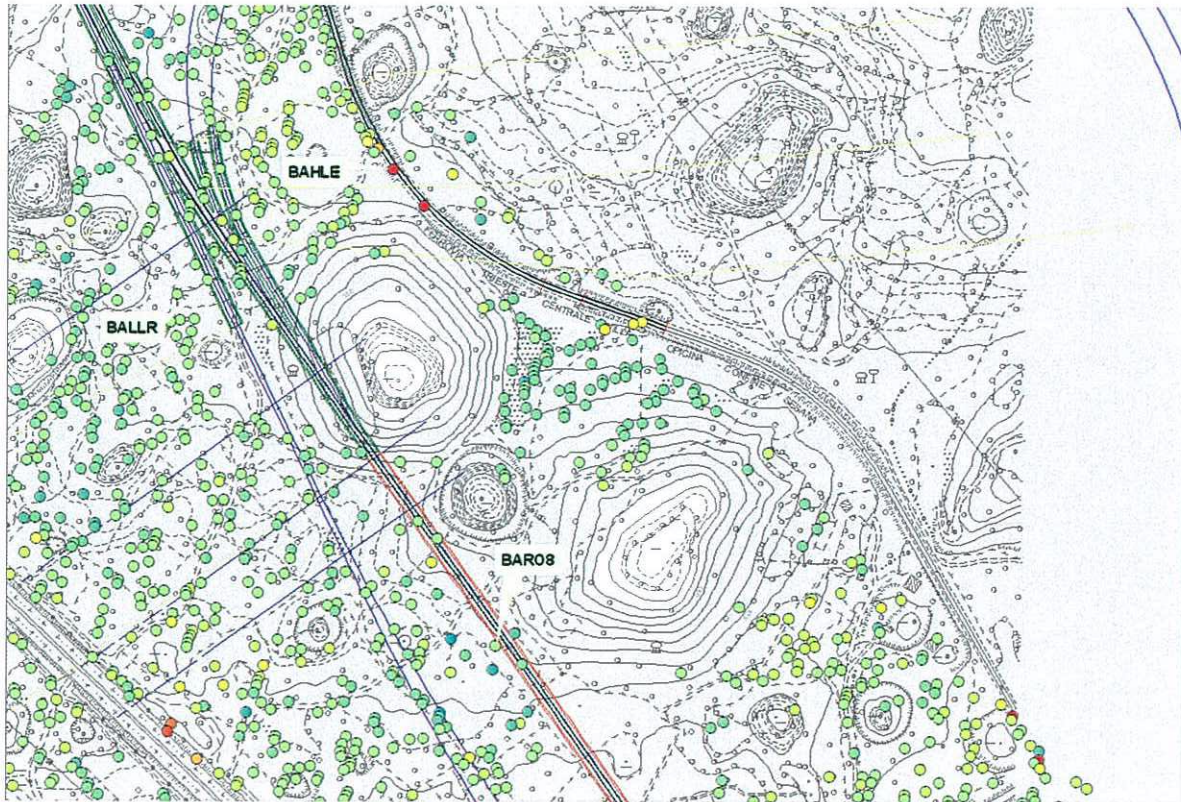
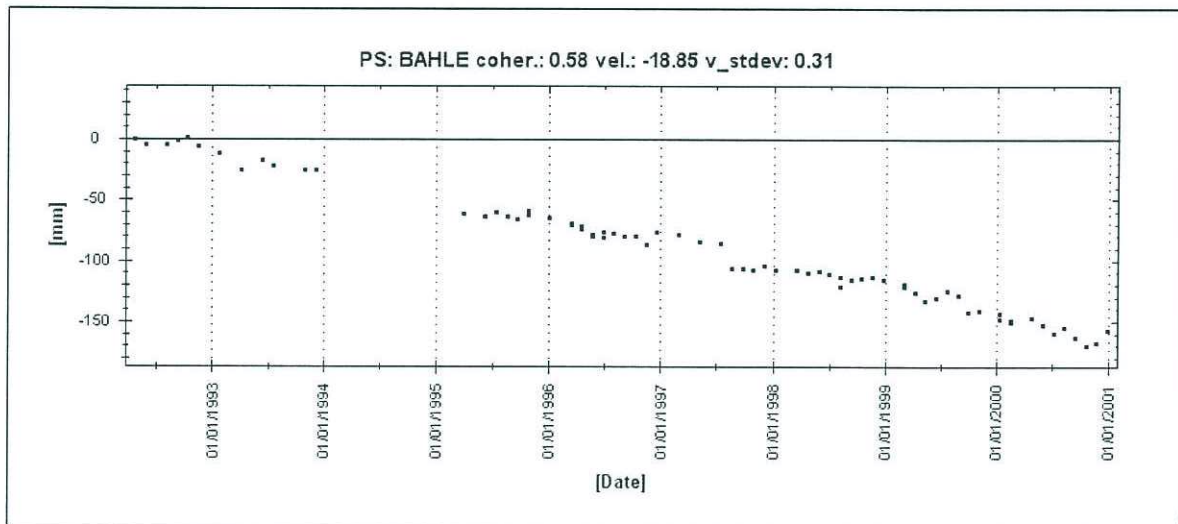


Figura 10: Dettaglio 1 – Elaborazione ERS 1992-2000.



TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	20 di 79

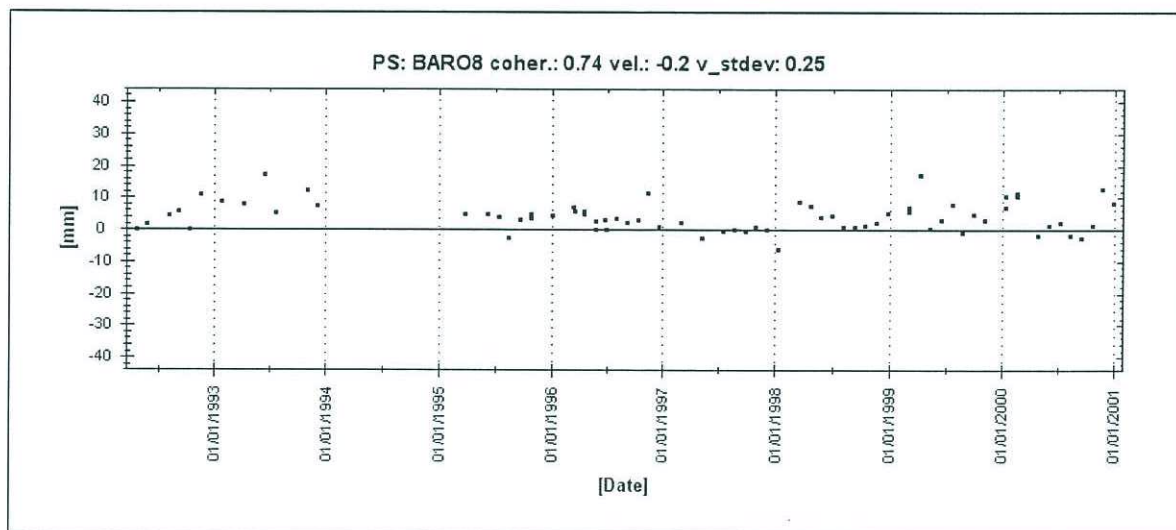
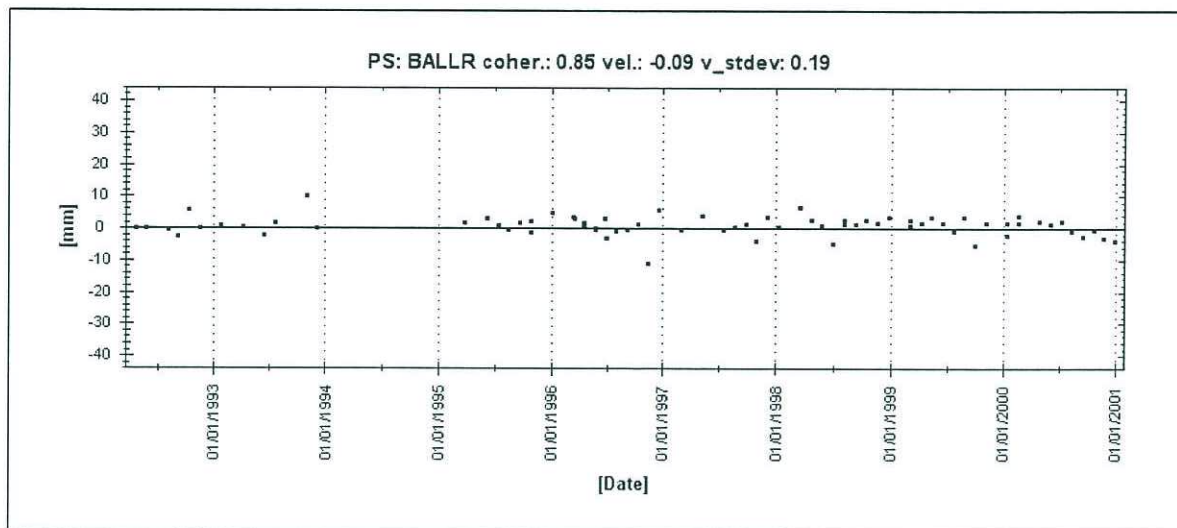


Figura 11: Serie Storiche dei PS indicati in Figura 10.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	21 di 79

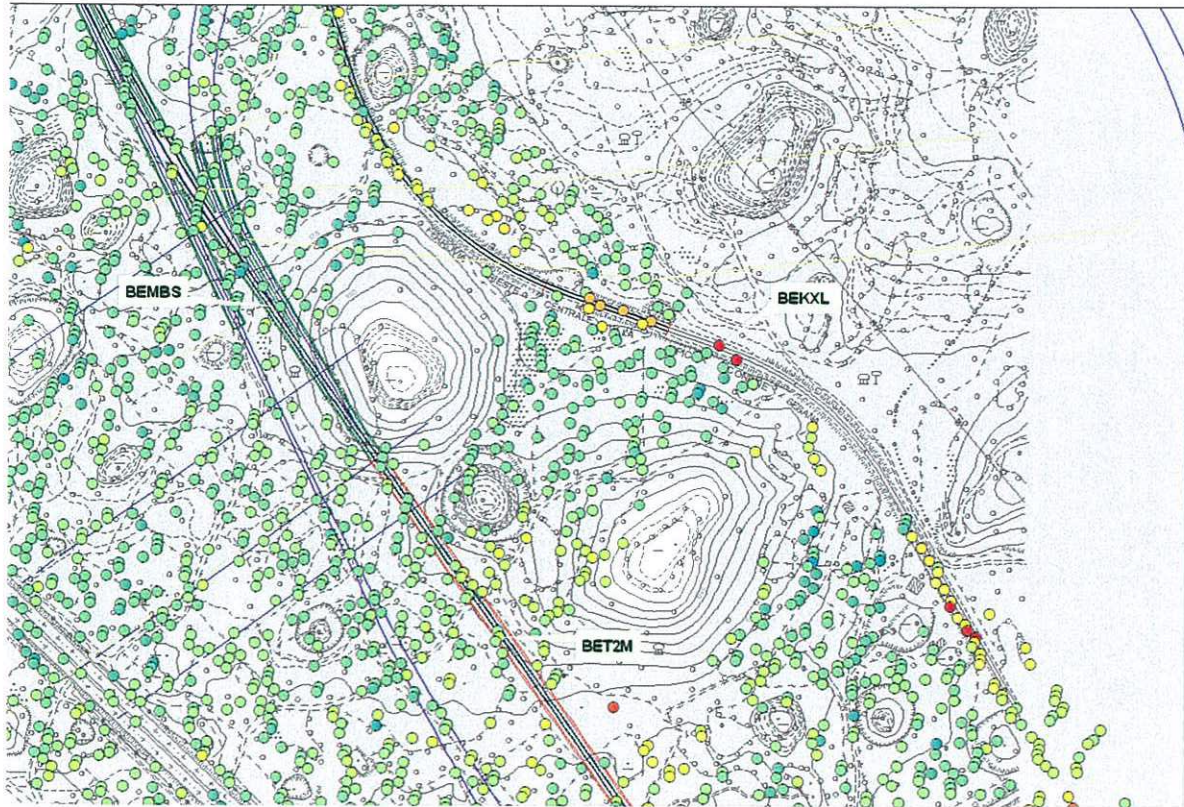
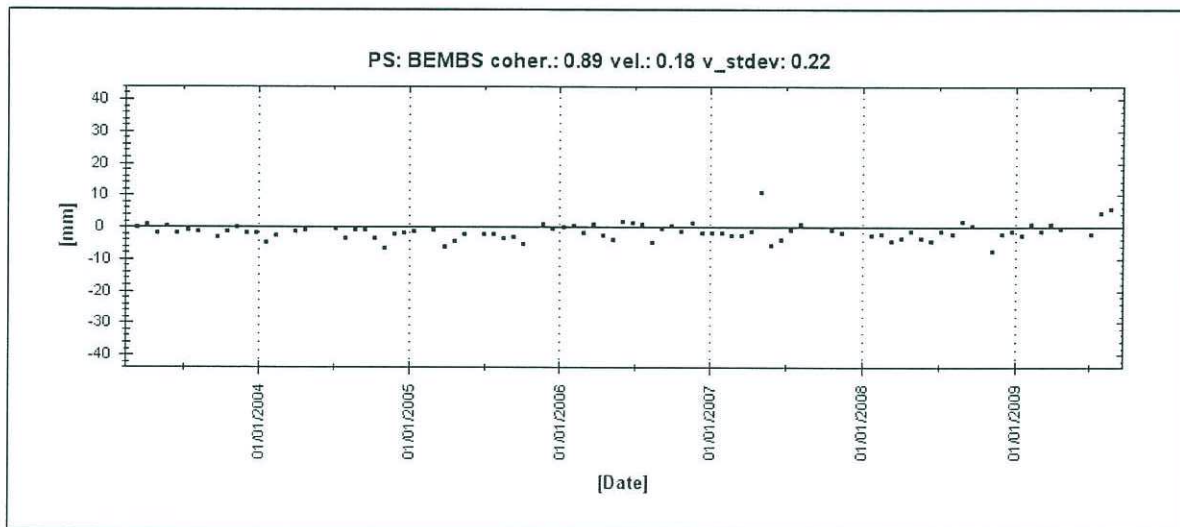
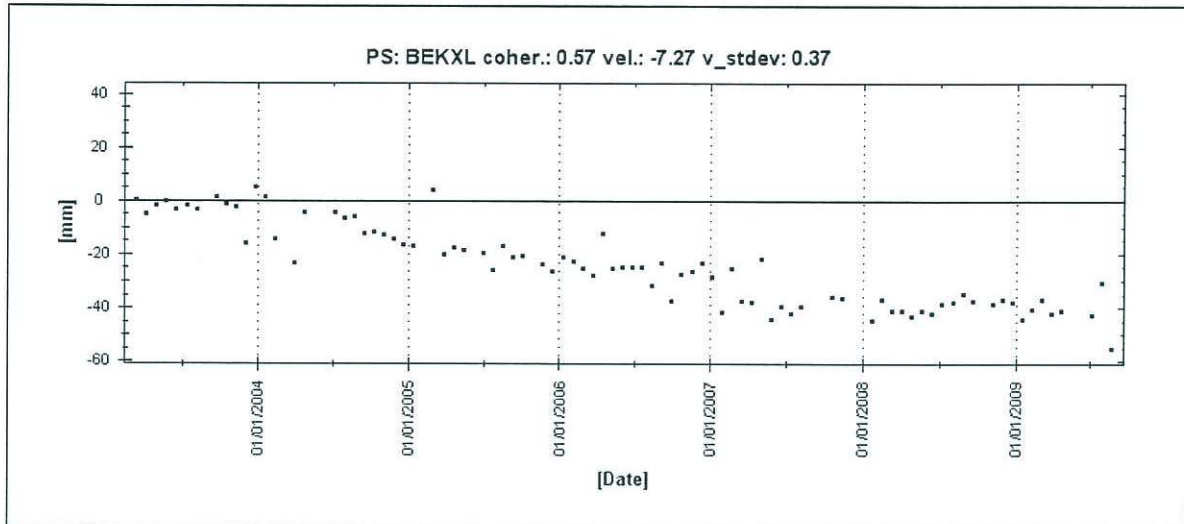


Figura 12: Dettaglio 1 – Elaborazione Radarsat 2003-2009.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	22 di 79



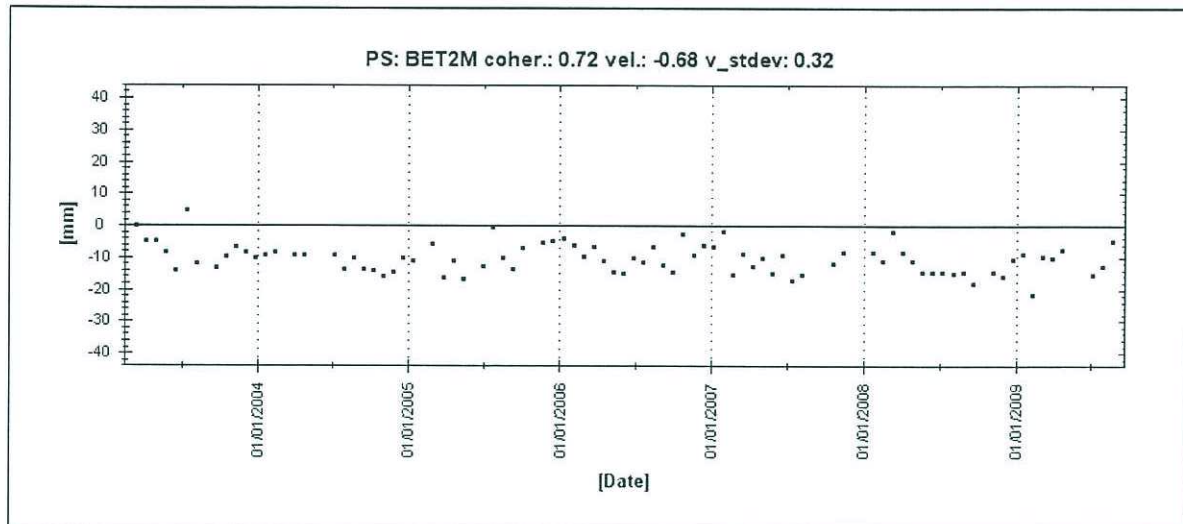


Figura 13: Serie Storiche dei PS indicati in Figura 12.

4.3.3 Dettaglio 2 –Progressiva relativa 5+050

In Figura 14 è rappresentato un tratto della linea Trieste-Ronchi in prossimità della progressiva relativa 5+050. Viene anche riportato in viola il catalogo frane della regione FVG i cui perimetri intersecano in alcuni punti la linea di progetto.

L'elaborazione ERS 1992-2000 (Figura 15) evidenzia una zona circoscritta (corrispondente alla progressiva relativa 5+050) con velocità di spostamento di circa -1.5 mm/anno in direzione di LOS. Più a sud (circa 350 m dal tracciato) una serie di punti di misura allineati lungo la ferrovia esistente registrano velocità di spostamento dell'ordine dei -4 mm/anno (es.: BCKM1).

Nell'analisi Radarsat 2003-2009 (Figura 22) gli spostamenti sono concentrati in singoli punti, come evidenziato nelle serie storiche che seguono (Figura 23). La zona della ferrovia lungo la costa è anche in questo caso caratterizzata da movimenti in alcuni casi maggiori di quelli 1992-2000 (es.:BG4LP).

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	24 di 79

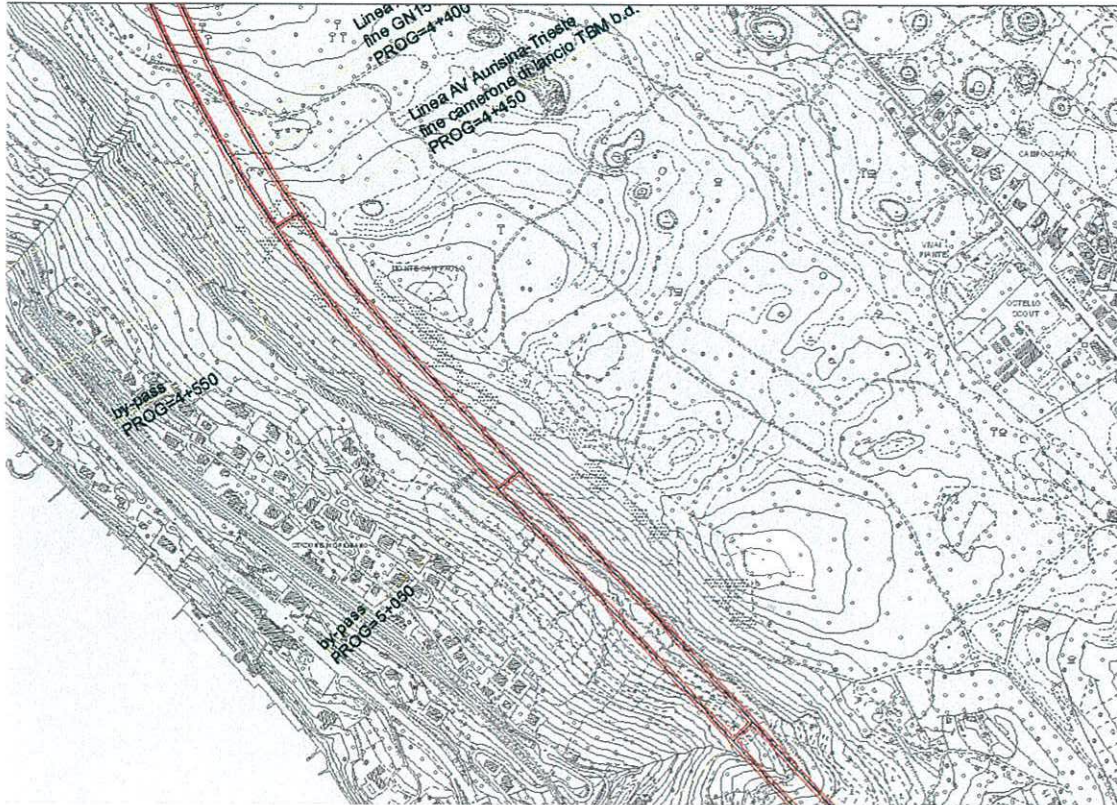


Figura 14: Dettaglio 2

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	25 di 79

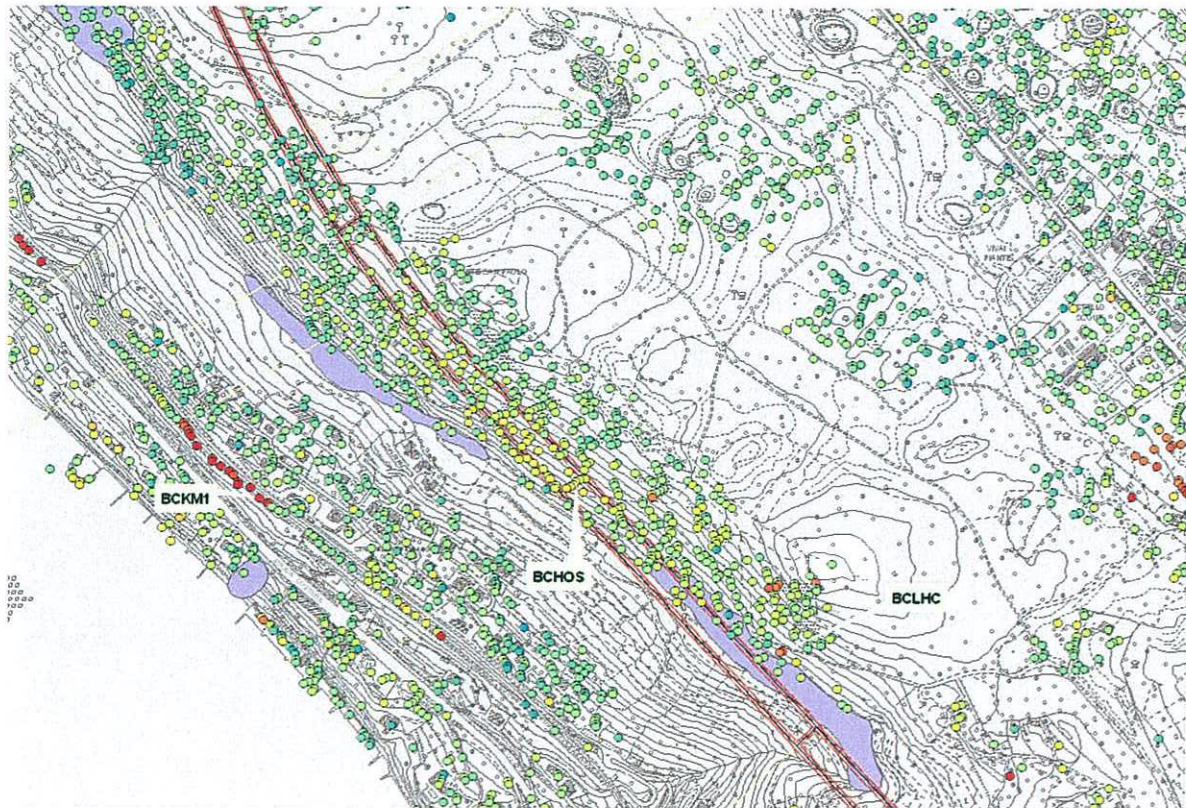
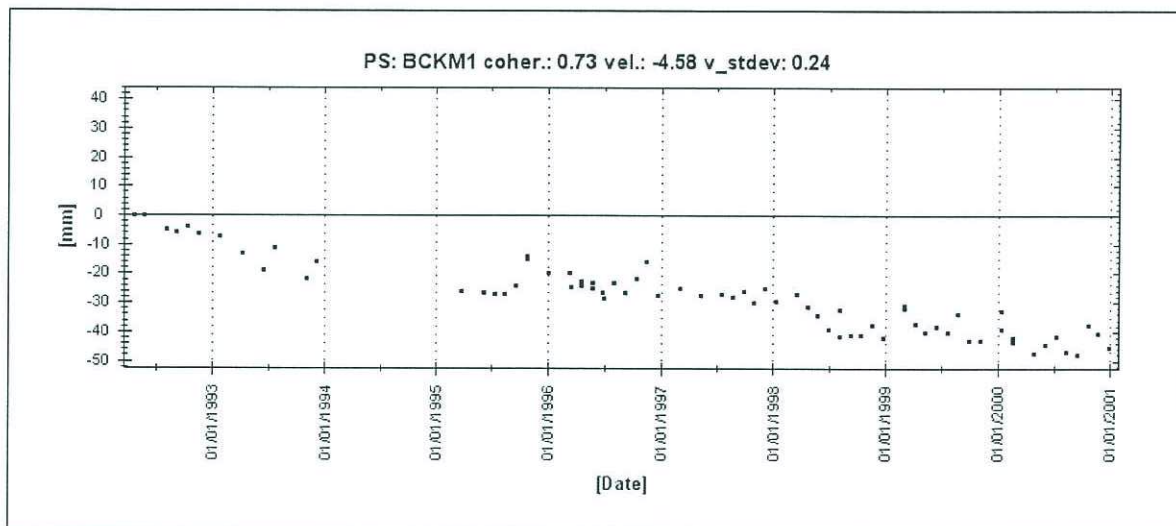


Figura 15: Dettaglio 2 – Elaborazione ERS 1992-2000



TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	26 di 79

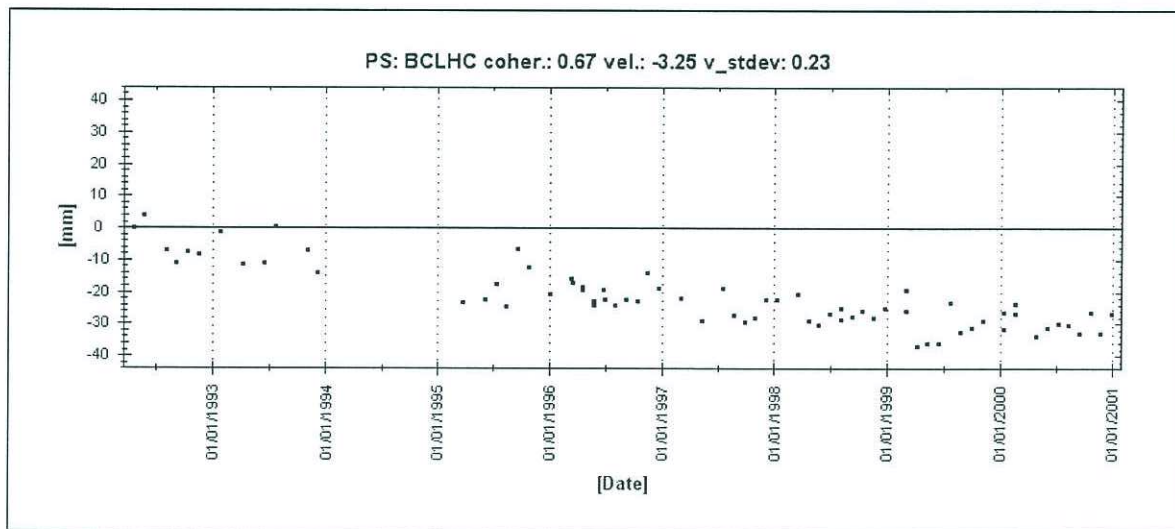
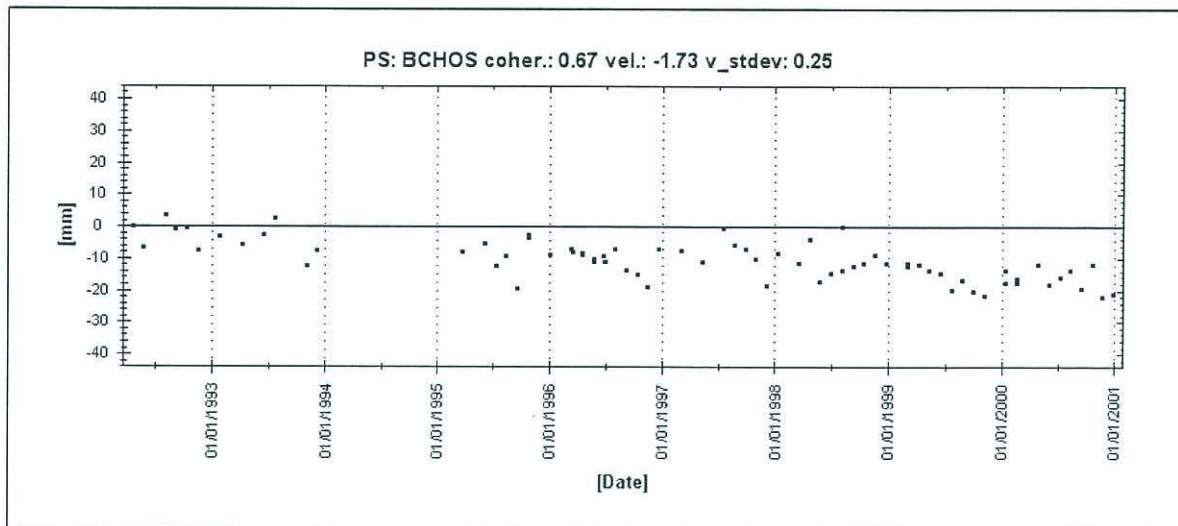


Figura 16: Serie Storiche dei PS indicati in Figura 15.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	27 di 79

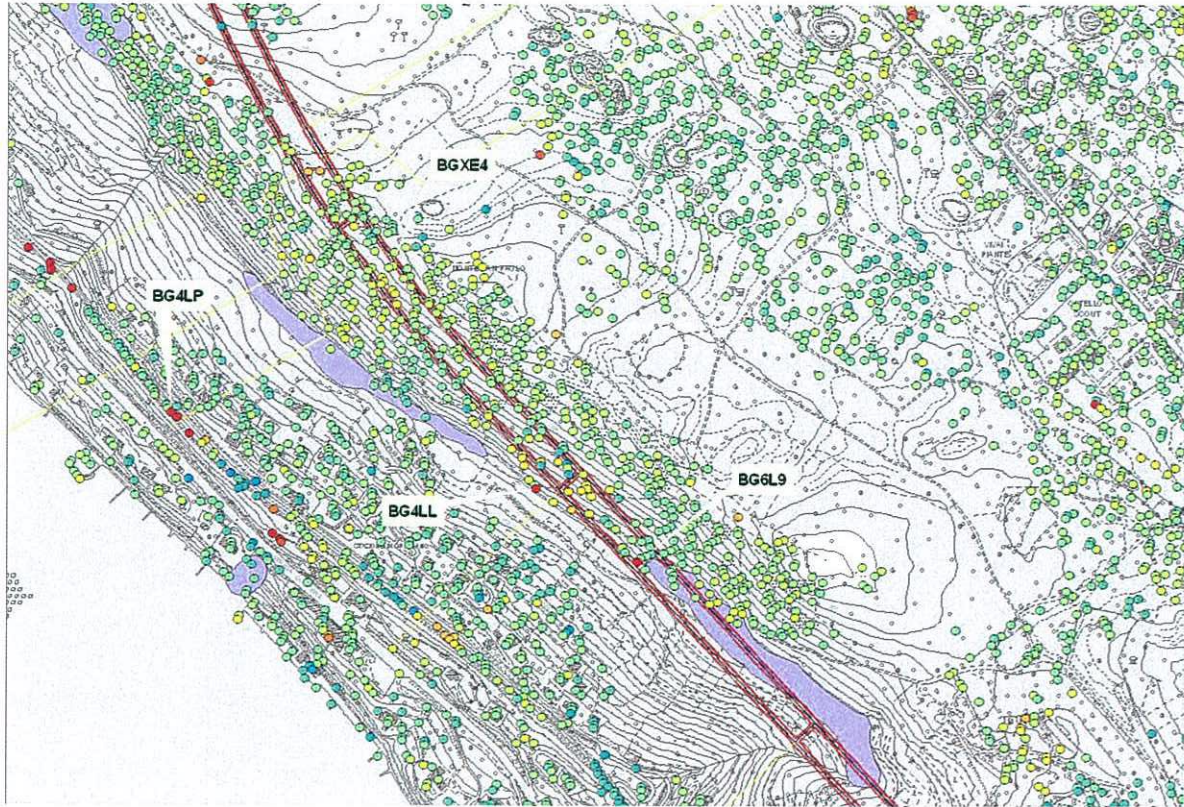
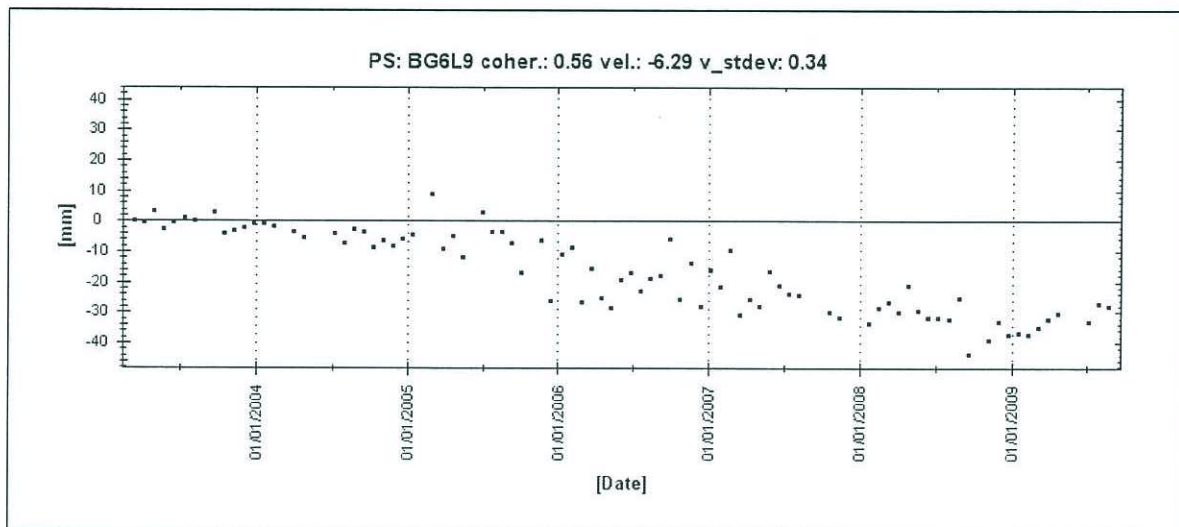
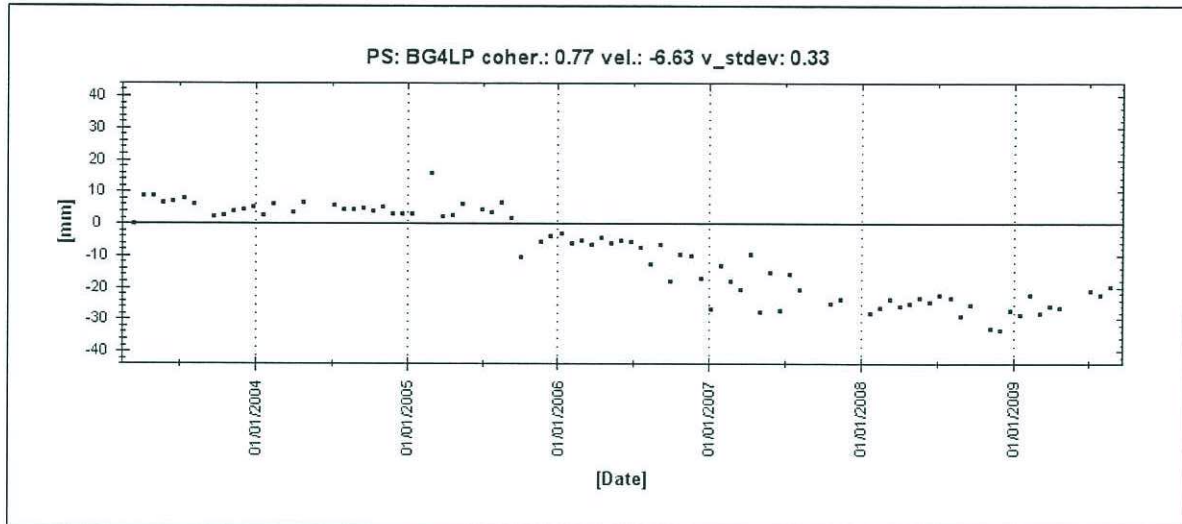


Figura 17: Dettaglio 2 – Elaborazione Radarsat 2003-2009

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	28 di 79



TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	29 di 79

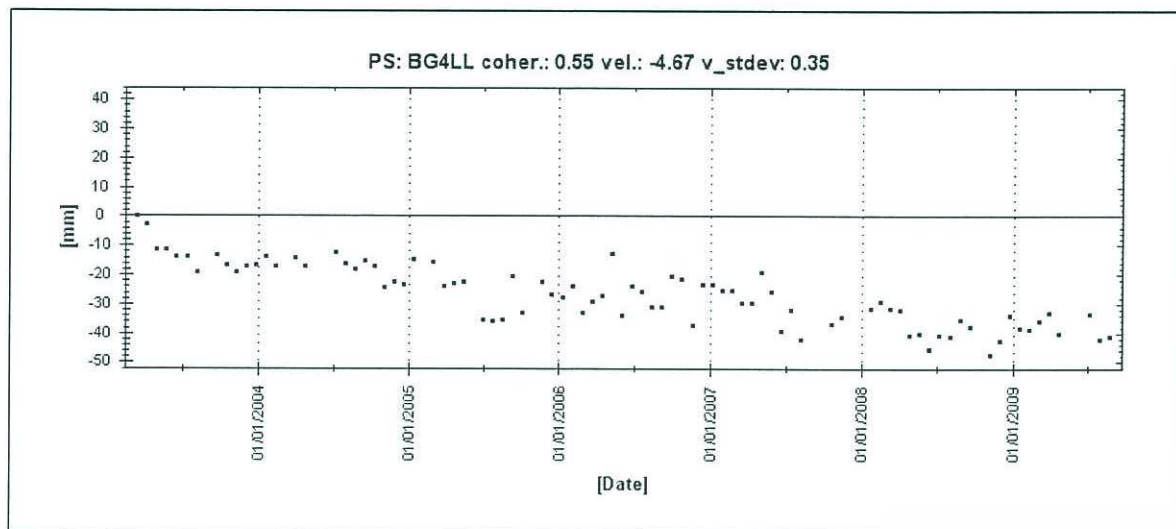
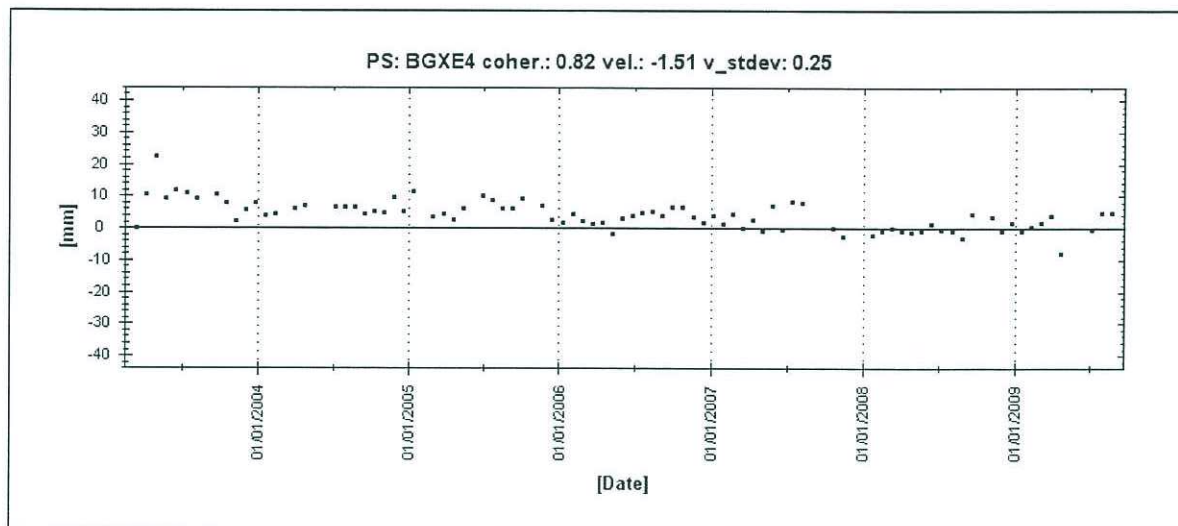


Figura 18: Serie Storiche dei PS indicati in Figura 20.

4.3.4 Dettaglio 3 - Progressiva relativa 8+050

In Figura 19 è rappresentato un tratto della linea Trieste-Ronchi in prossimità della progressiva relativa 8+050. L'area, situata a sud dell'abitato di Prosecco, risulta prevalentemente vegetata ed è attraversata da due poligoni IFFI a monte della linea di progetto. L'elevata vegetazione spiega la bassa densità di punti di misura in quest'area.

L'analisi satellitare storica (ERS 1992-2000) evidenzia una sostanziale stabilità in tutta la zona ad eccezione di singoli PS distanti dal tracciato di progetto un centinaio di metri.

Nei dati Radarsat 2003-2009 si distinguono, sempre a monte del tracciato, un insieme di PS con velocità media di circa -3 mm/anno.

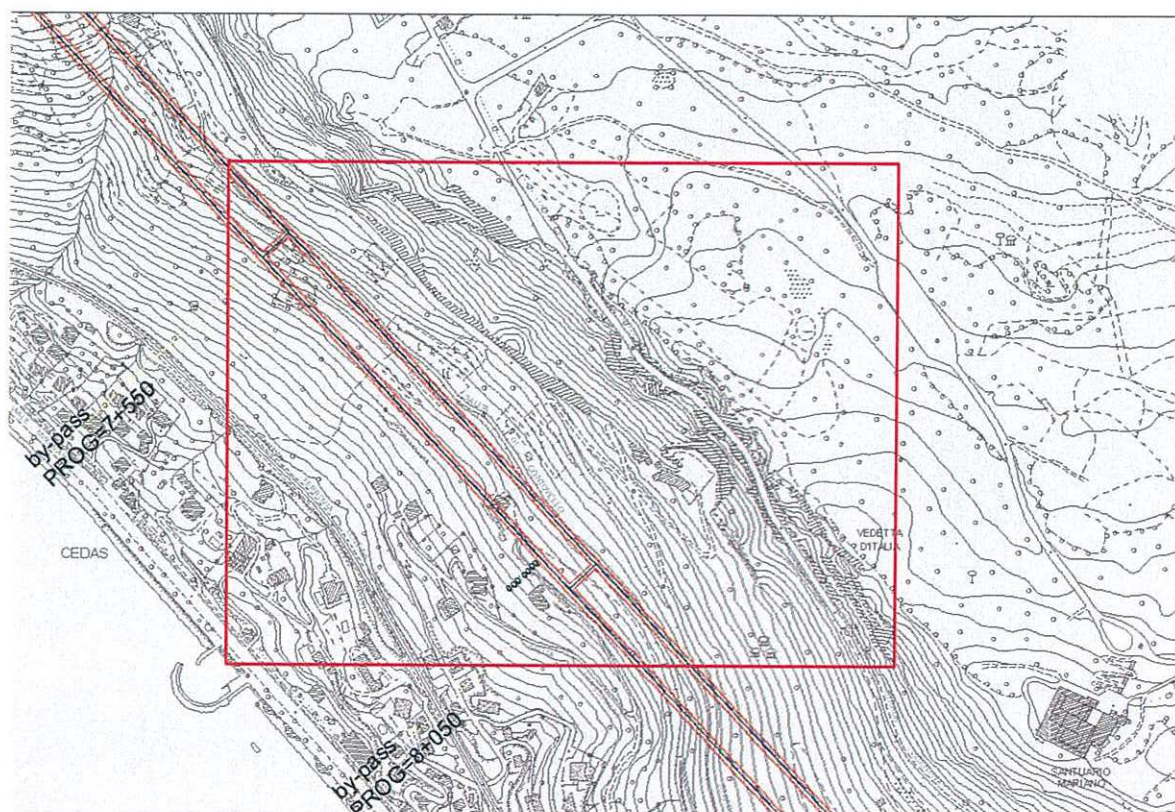


Figura 19: Dettaglio 3.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	31 di 79

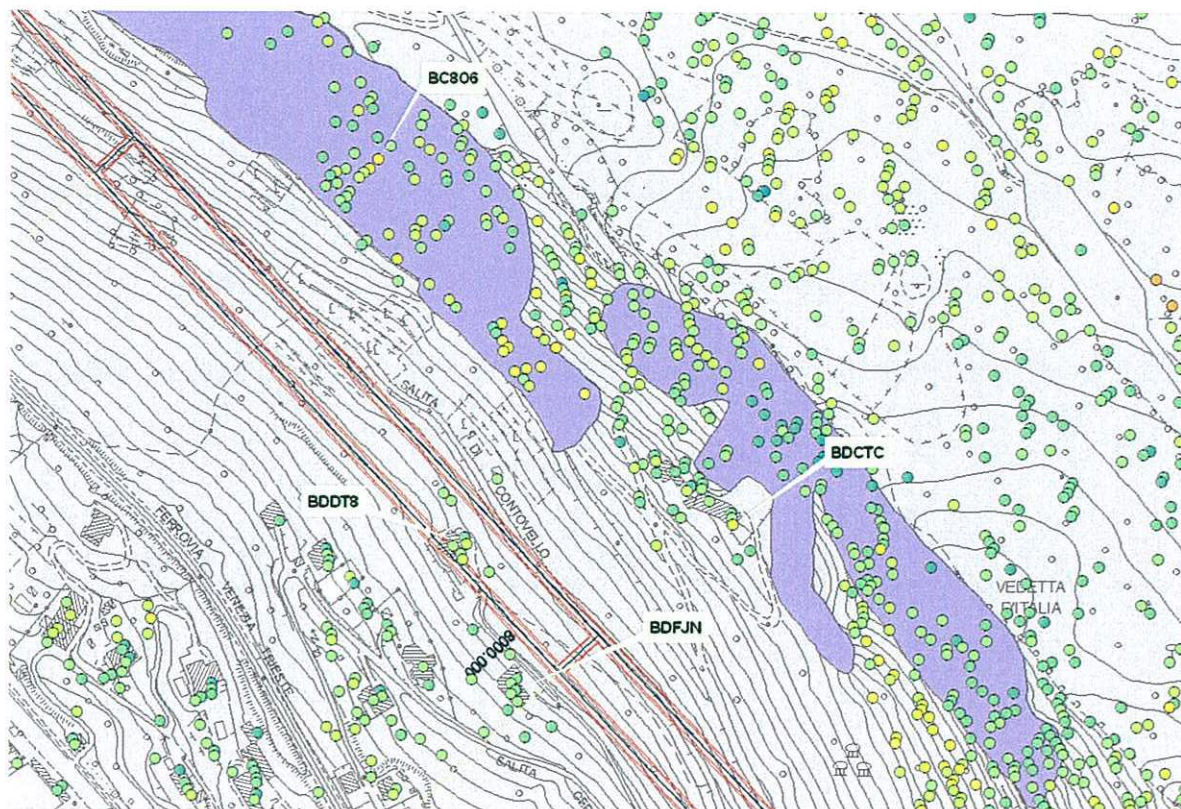
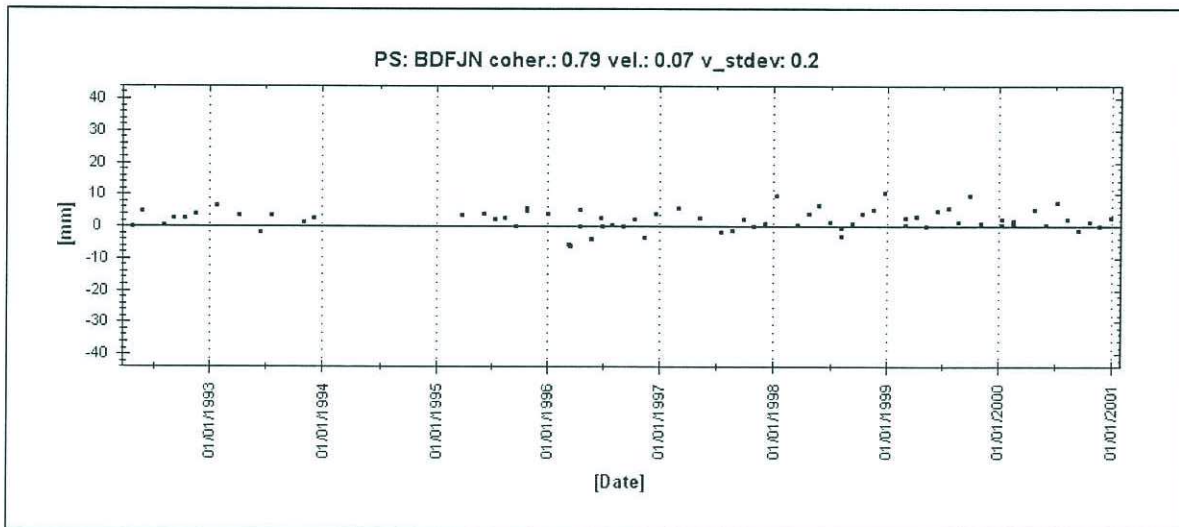
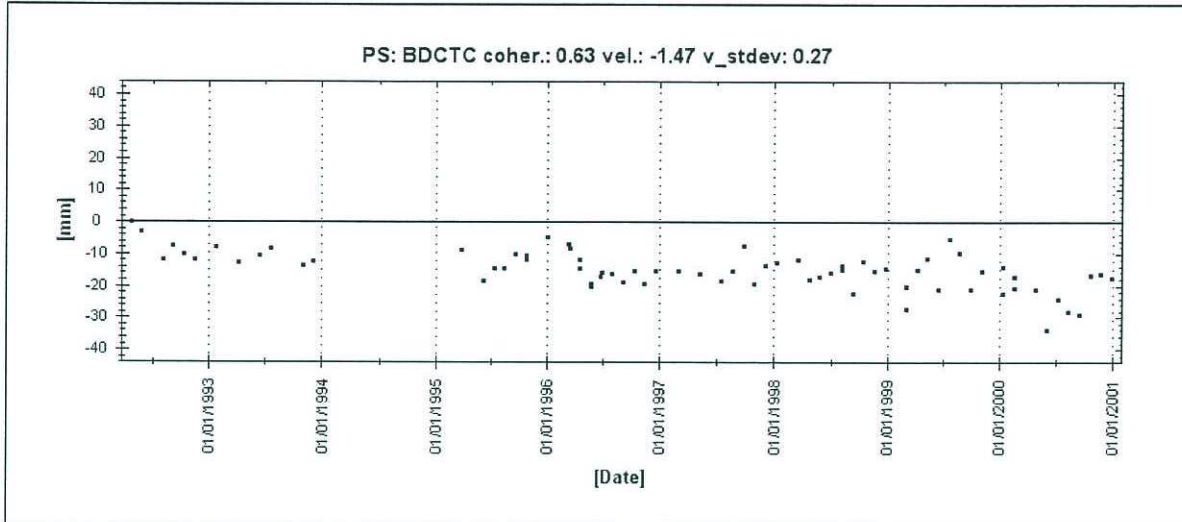


Figura 20: Dettaglio 3: elaborazione ERS 1992-2000.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	32 di 79



TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	33 di 79

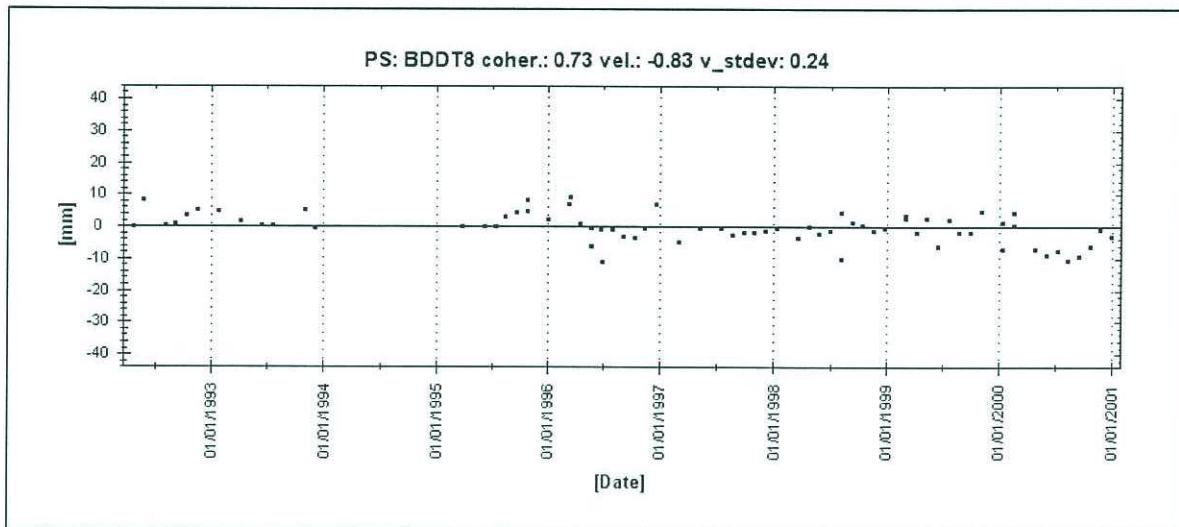
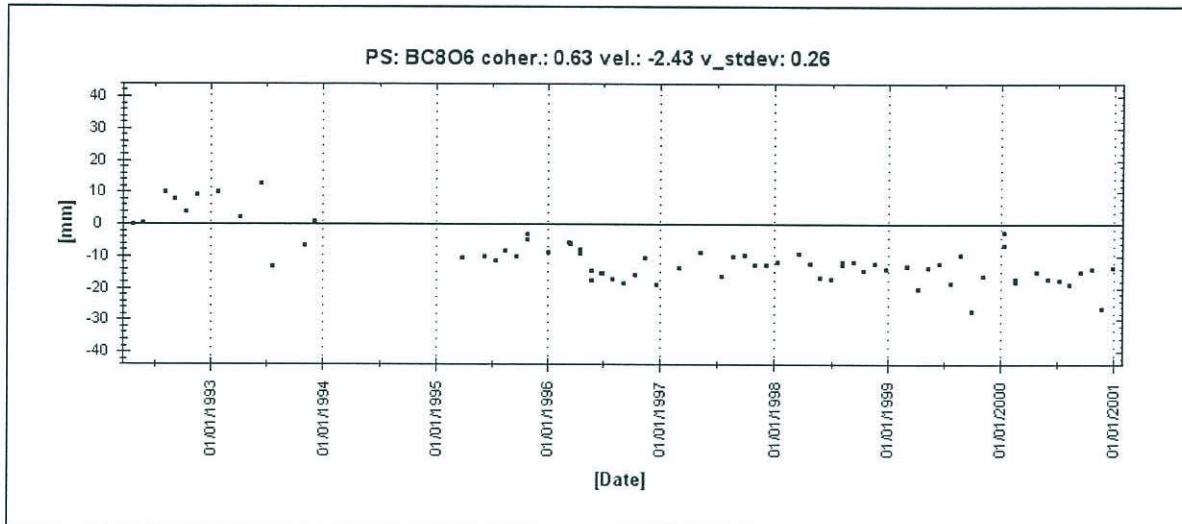


Figura 21: Serie Storiche dei PS indicati in Figura 20.

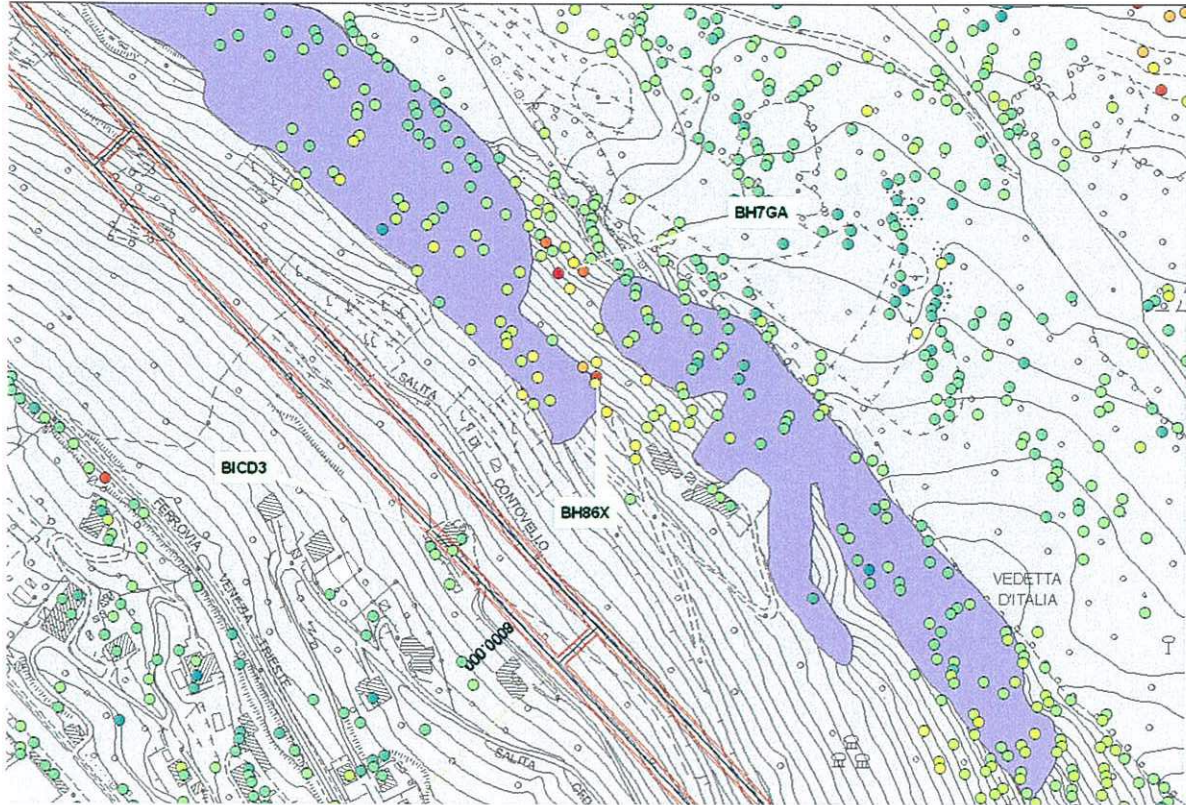
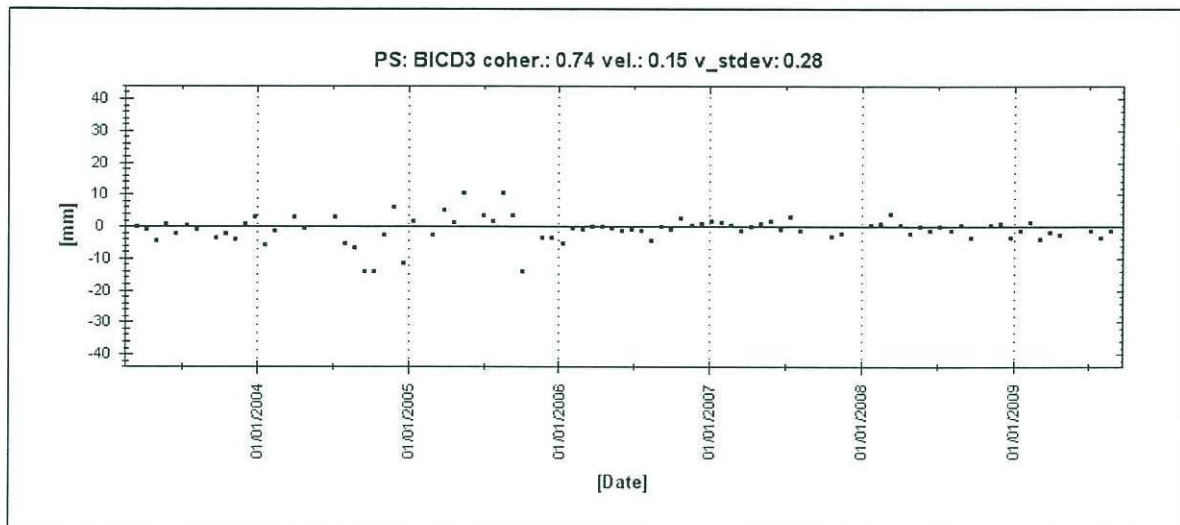
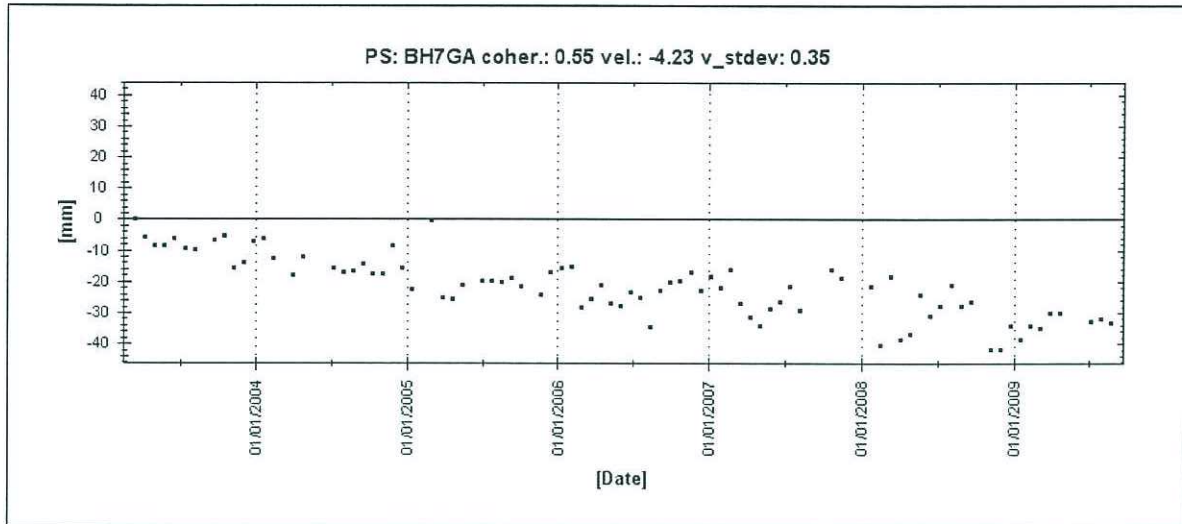


Figura 22: Dettaglio 3: elaborazione Radarsat 2003-2009.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	35 di 79



TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	36 di 79

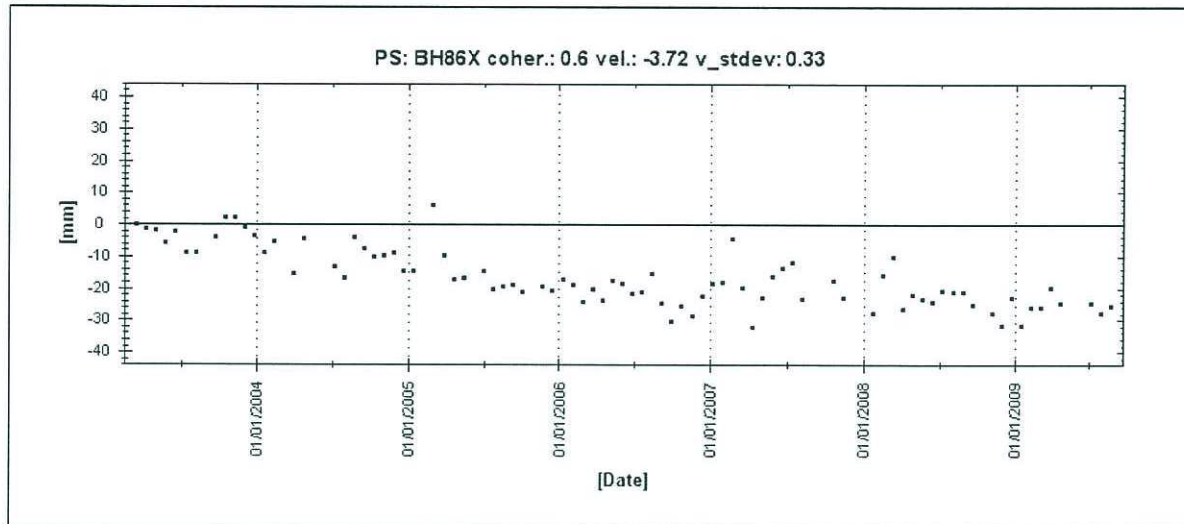


Figura 23: Serie Storiche dei PS indicati in Figura 20.

4.3.5 Dettaglio 4 – Progressiva relativa 9+550

Il dettaglio 4, centrato sulla progressiva relativa 9+550 della linea Trieste-Ronchi, è caratterizzato da sostanziale stabilità in entrambe le elaborazioni satellitari (ERS e Radarsat) ad eccezione della zona a monte del tracciato (punti di misura: BDOPO e BIRQT) dove si evidenzia uno spostamento di qualche millimetro.

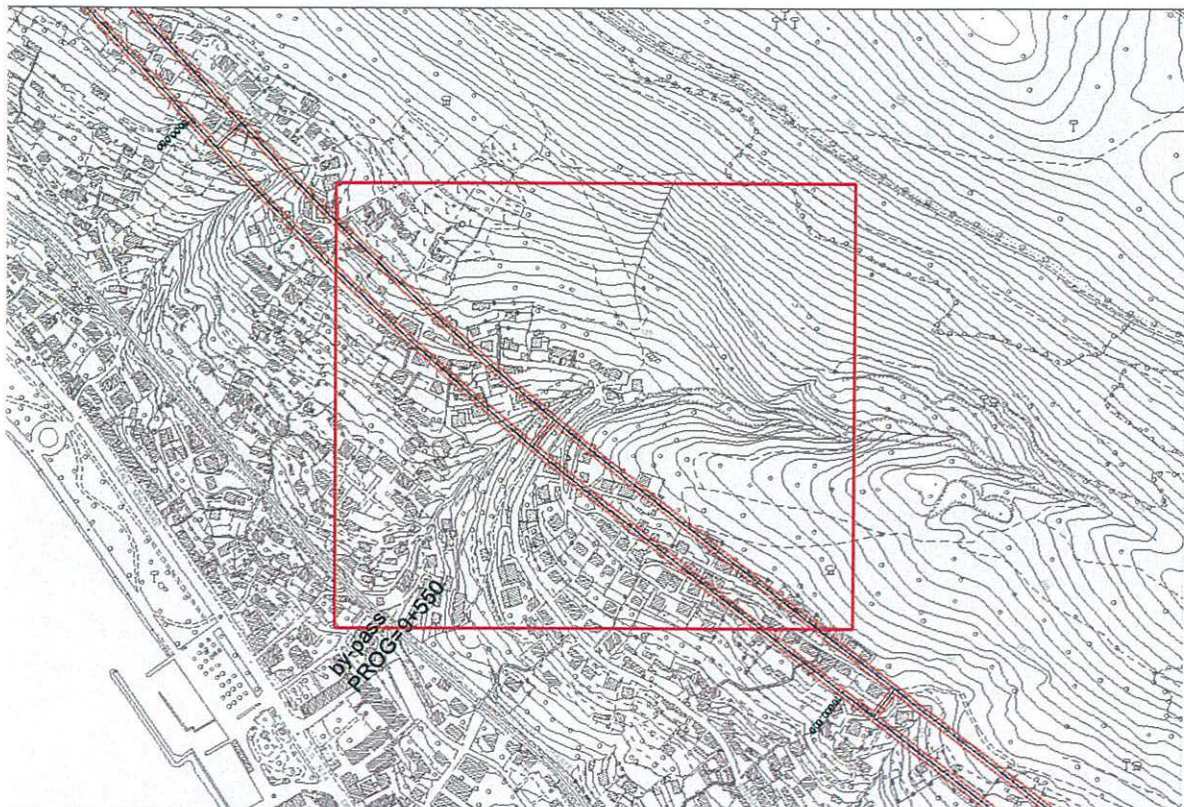


Figura 24: Dettaglio 4

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	38 di 79

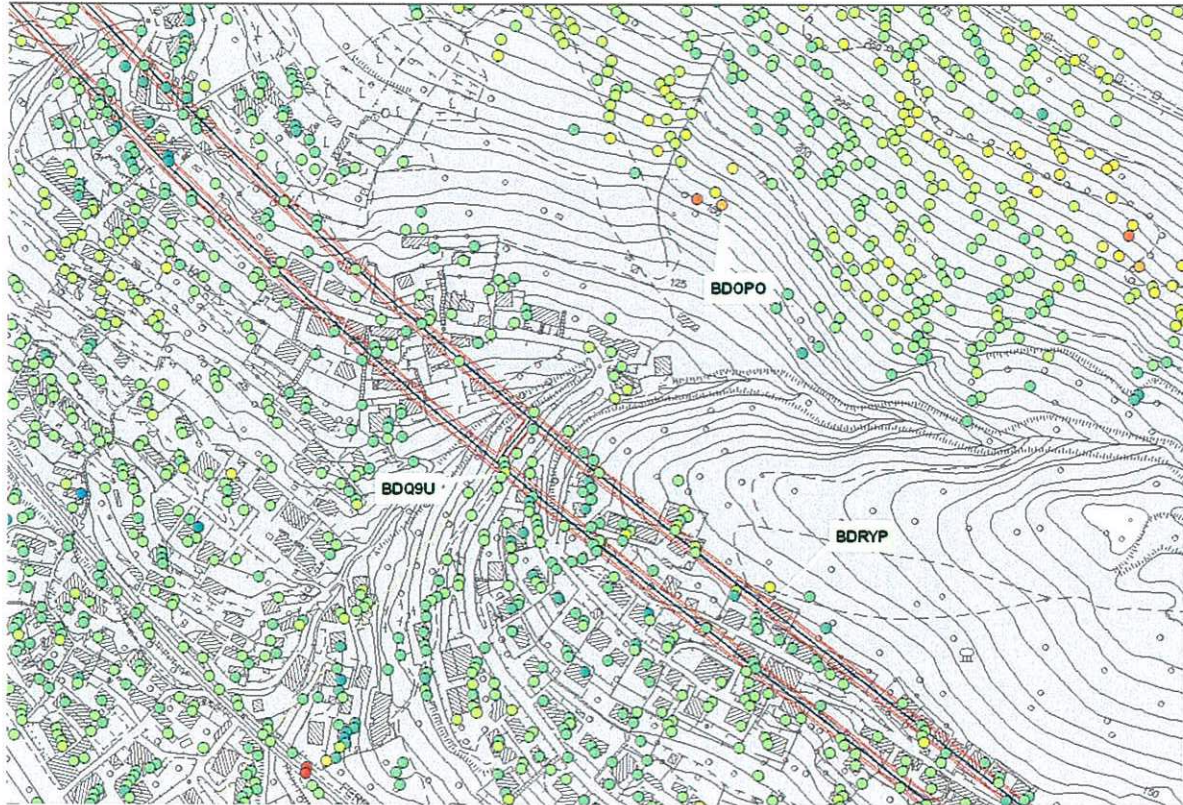
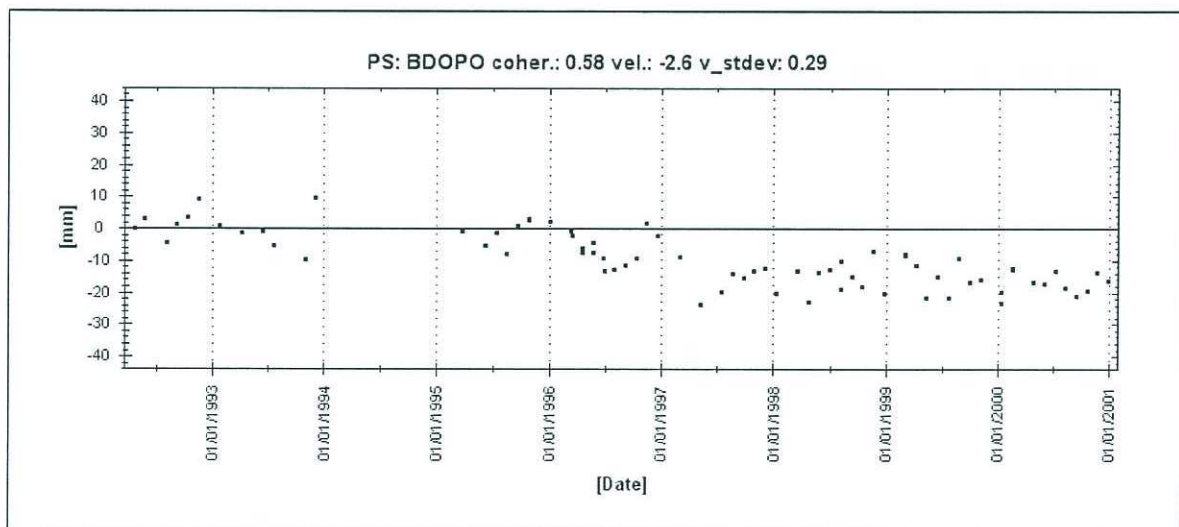


Figura 25: Dettaglio 4: elaborazione ERS 1992-2000 .



TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	39 di 79

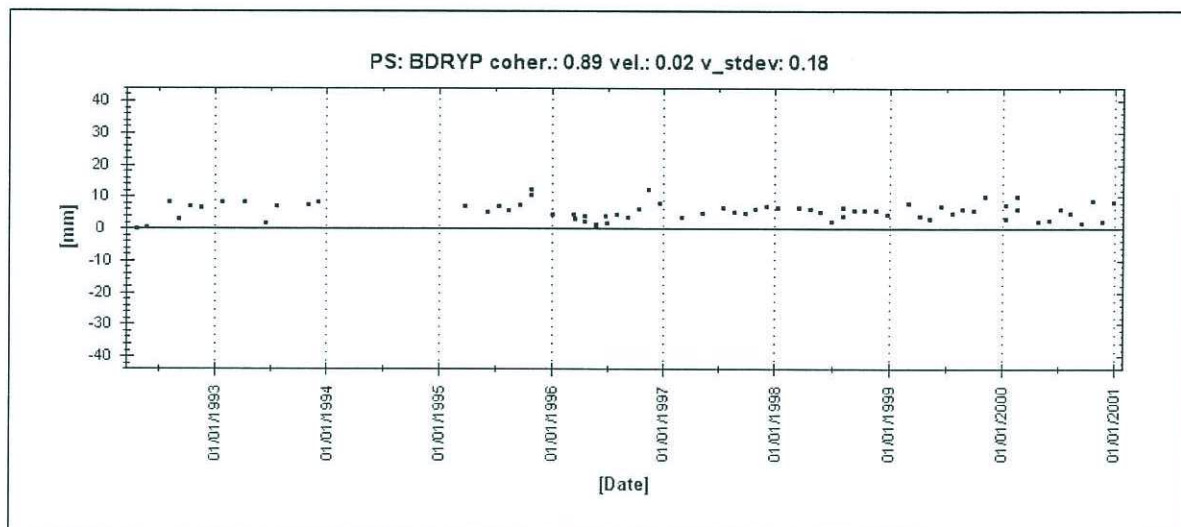
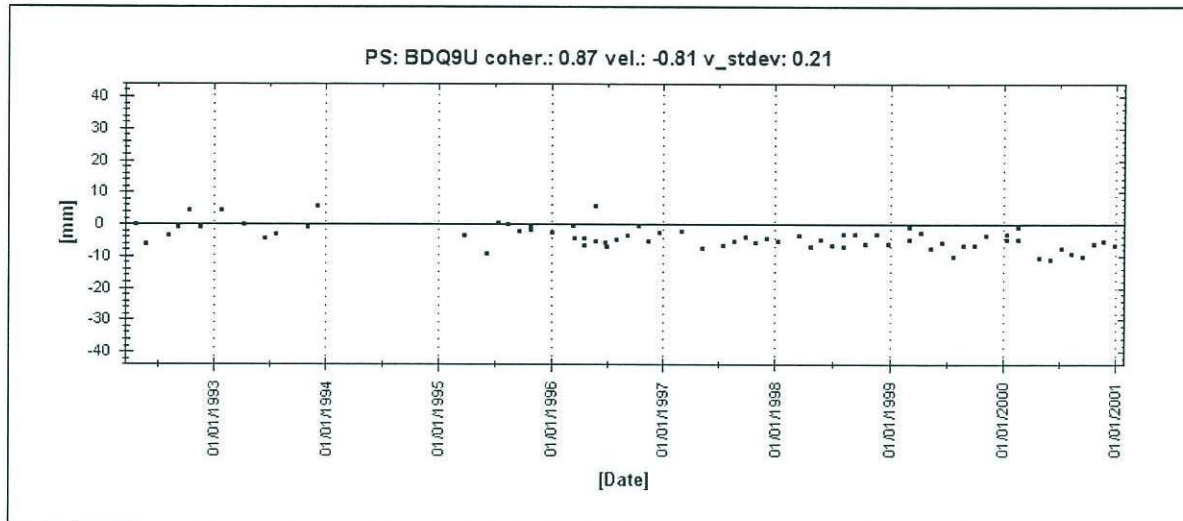


Figura 26: Serie Storiche dei PS indicati in Figura 25 Figura 20.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	40 di 79

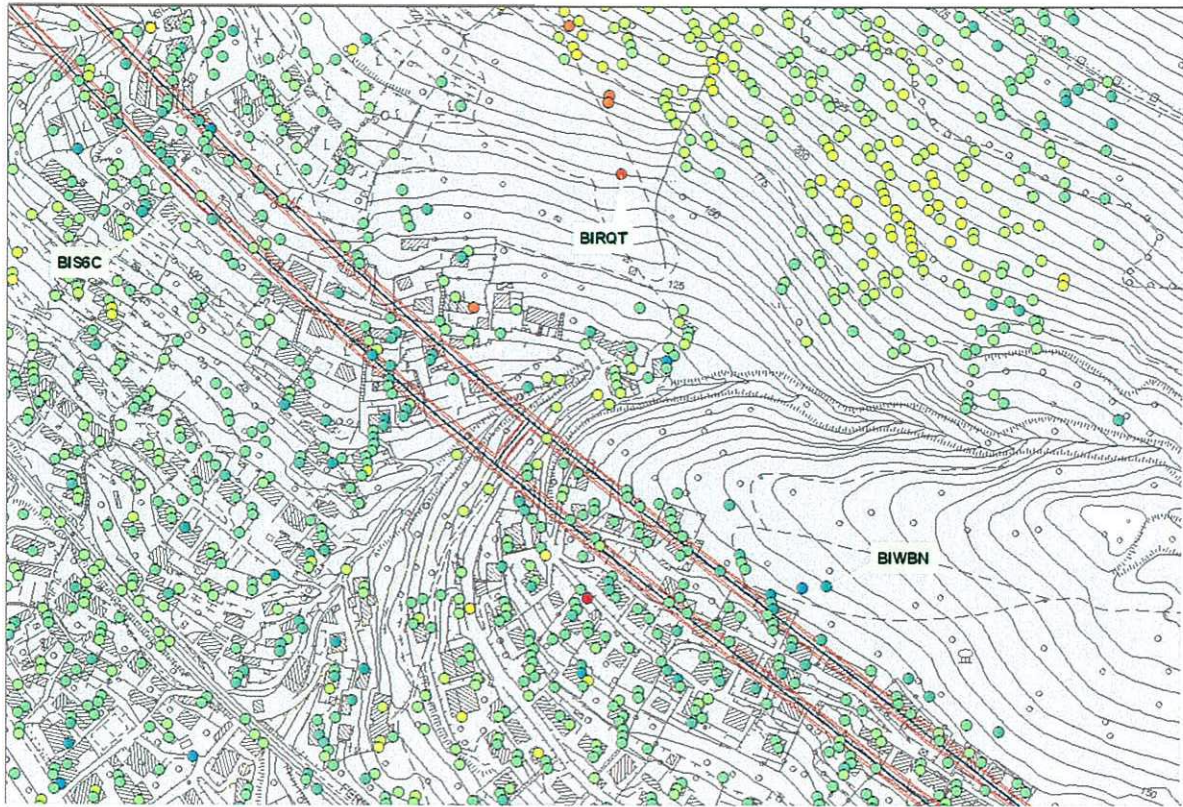
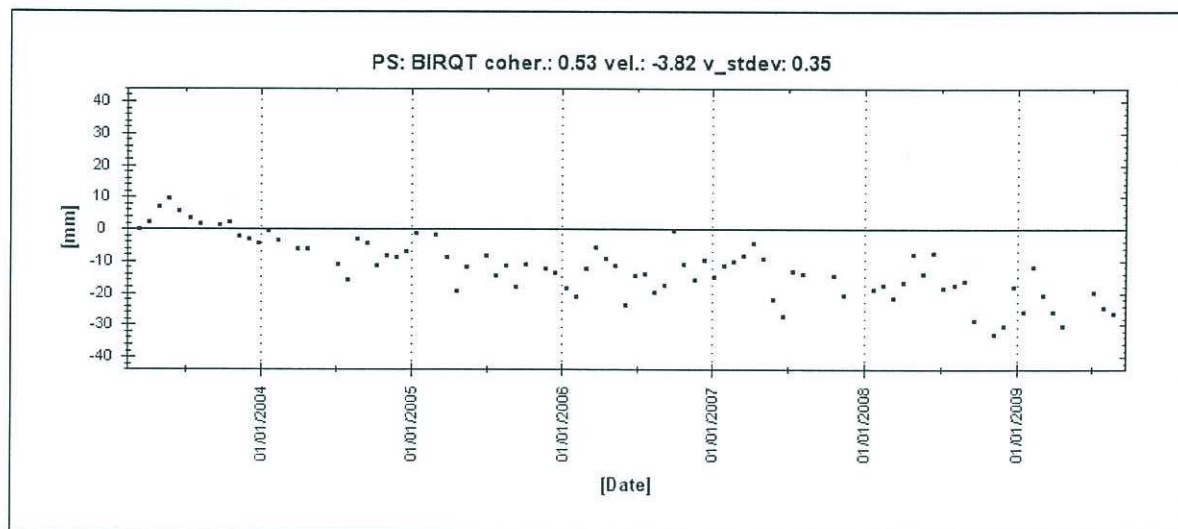
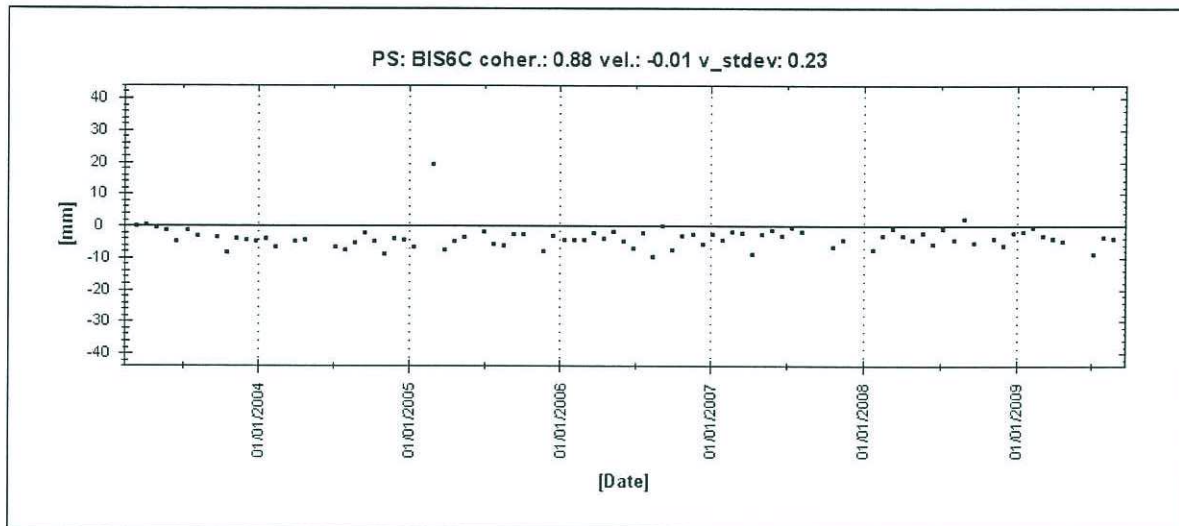


Figura 27: Dettaglio 4: elaborazione Radarsat 2003-2009.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	41 di 79



TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	42 di 79

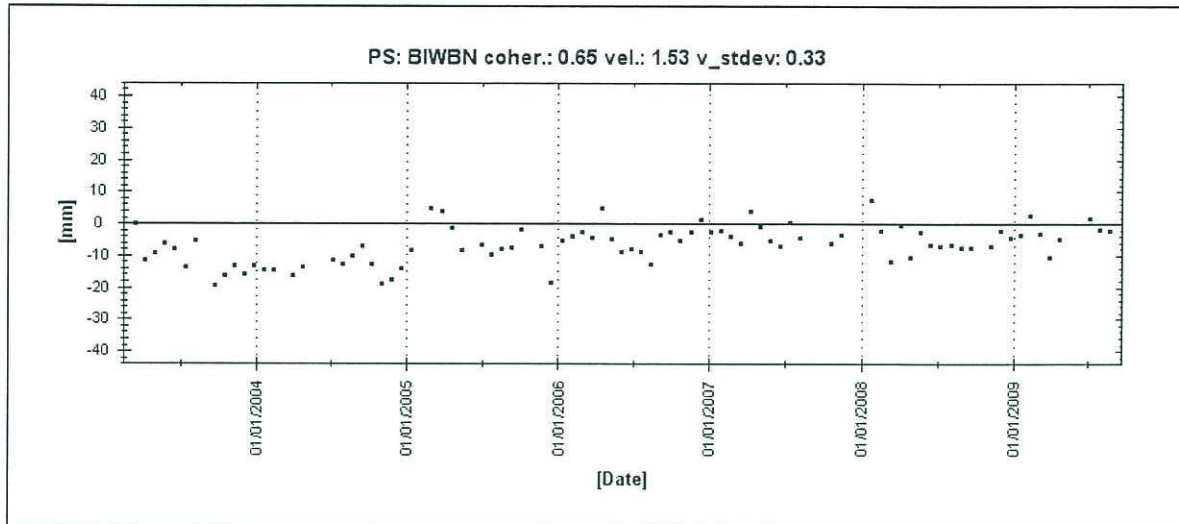


Figura 28: Serie Storiche dei PS indicati in Figura 27.

4.3.6 Serie storiche di spostamento

Nelle immagini successive si riportano le posizioni dei PS per i quali si è calcolata la serie storica di spostamento.

**NUOVA LINEA AV/AC VENEZIA-TRIESTE
TRATTA RONCHI-TRIESTE**

**Analisi delle deformazioni superficiali
con Tecnica SqueeSAR™**



**Prodotto Linear
Analisi Radarsat 2003-2009**

LEGENDA

- Serie Storiche
- Velocità Media Annua
- Area di Interesse
- LINEA AV/AC Ronchi-Trieste

0 2 km

Supporto cartografico: Virtual Earth © Microsoft Corporation
Map Projection:
Transverse Mercator, Datum Monte Mario, Fuso 2
© Tele-Rilevamento Europa 2010

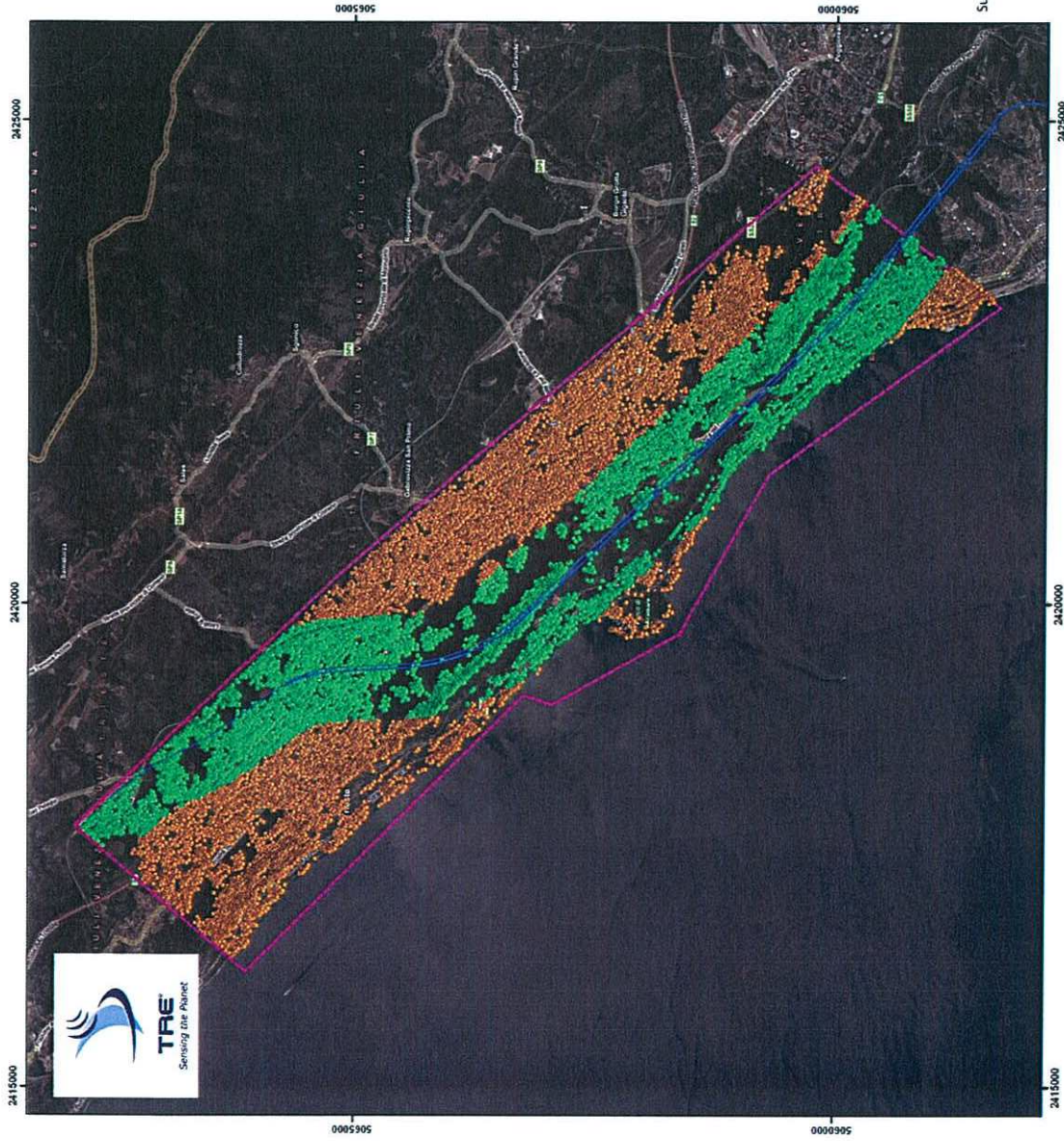


Figura 29: Posizione dei PS ottenuti dall'elaborazione satellitare : in verde i punti per i quali è stata fornita la serie storica di spostamento.



LINEA AV/AC
PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 0X 001	A	44 di 79

4.3.7 Quota ellissoidica dei PS

L'elaborazione PSInSAR™ consente di stimare, per ogni PS identificato, i valori della sua quota ellissoidica.

Le immagini successive riportano i valori di quota espressi in [m] così calcolati per ogni elaborazione PSInSAR™.

Il valore di quota è utile per identificare se la parte di struttura che meglio riflette l'energia elettromagnetica, e si comporta quindi come un *Permanent Scatterer*, si trova alla base o sulla sommità di una struttura (ad esempio è una porzione di tetto o il diedro formato tra la strada e la facciata dell'edificio stesso). Per quanto riguarda l'errore nella stima della quota si rimanda a quanto riportato nel *Manuale della Tecnica PSInSAR™* allegato al presente rapporto.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	45 di 79

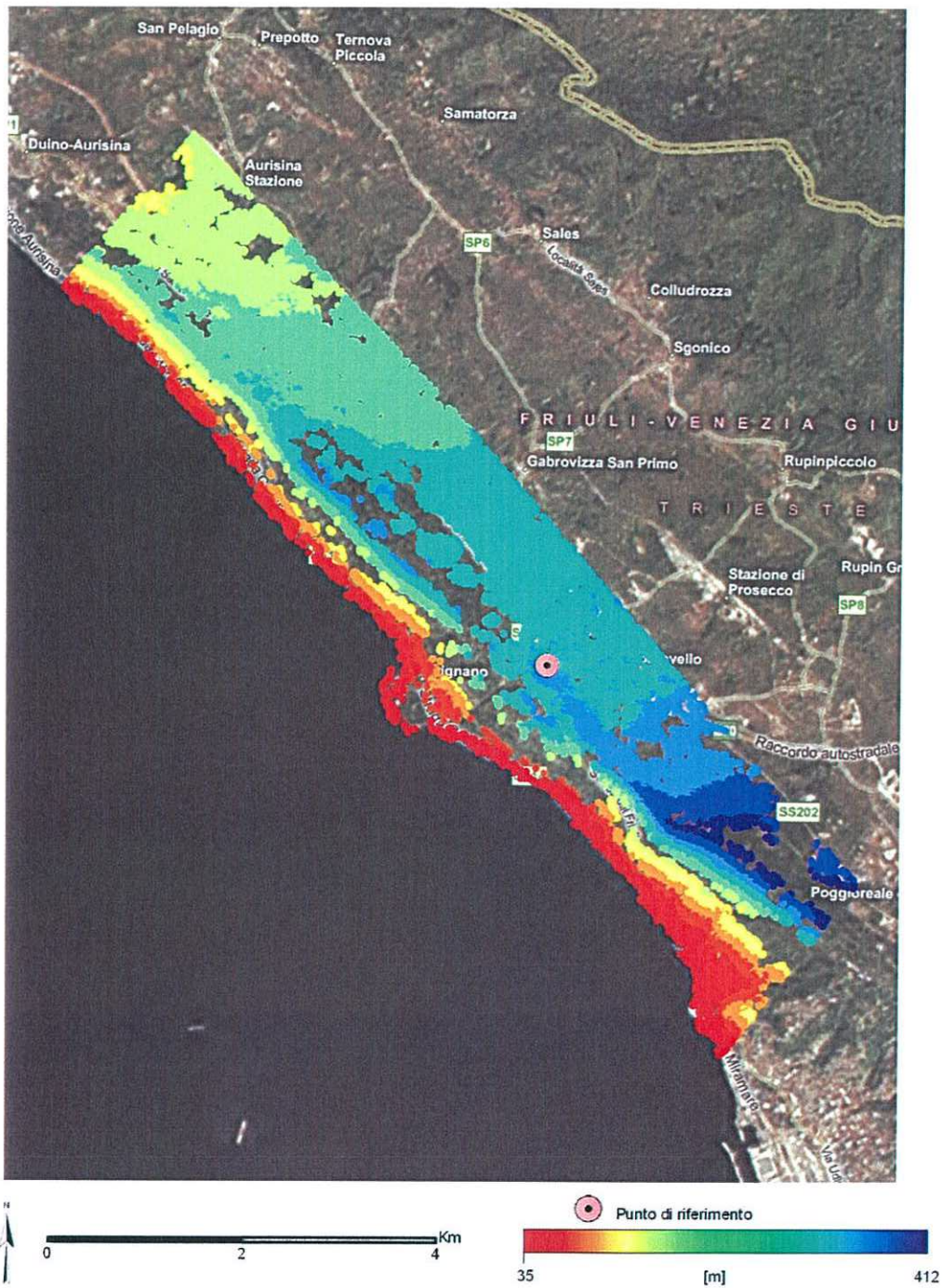


Figura 30: Quota ellissoidica dei PS ottenuti dall'elaborazione ERS.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	46 di 79

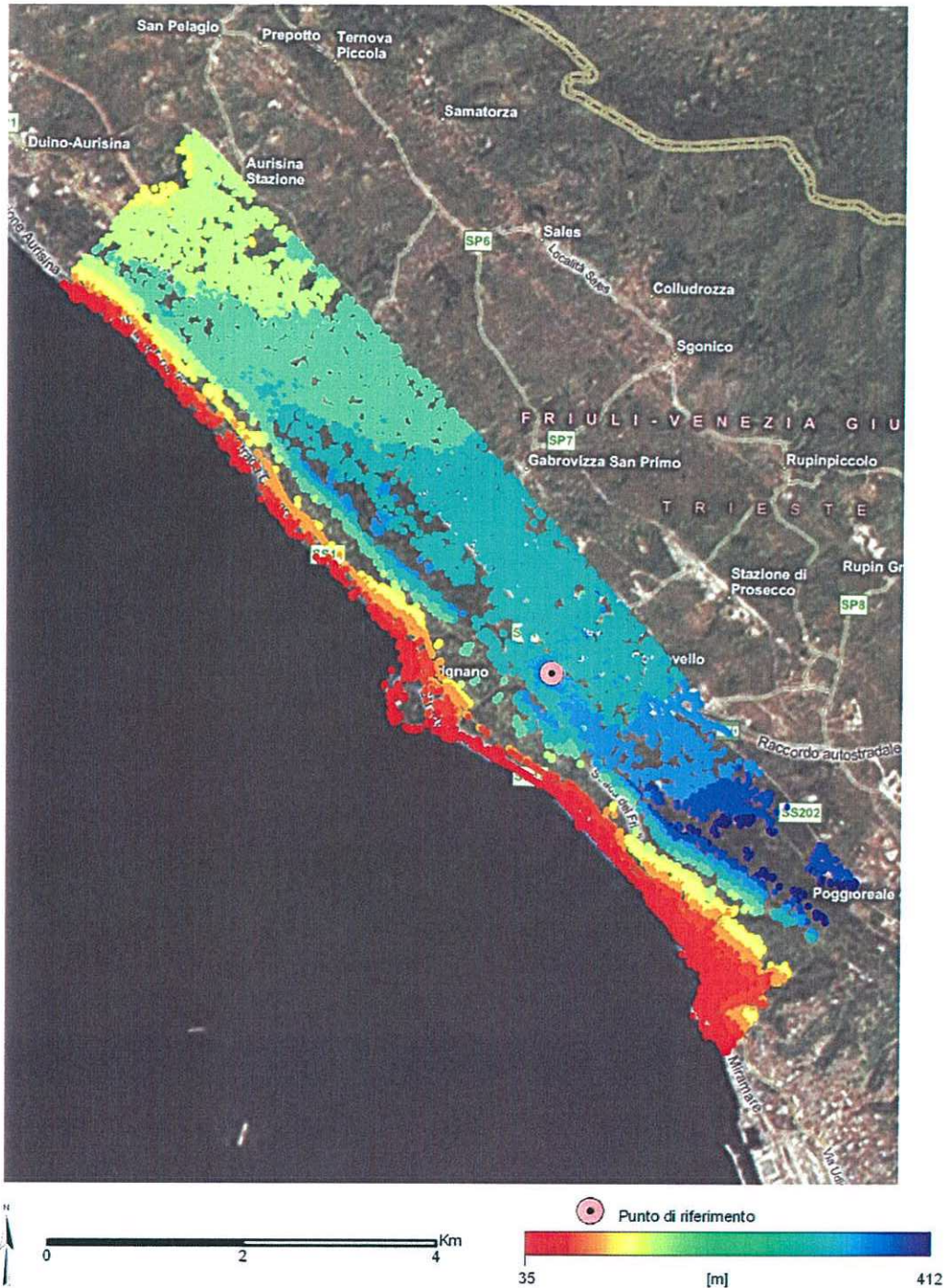


Figura 31: Quota ellissoidica dei PS ottenuti dall'elaborazione RSAT .

	LINEA AV/AC PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste					
TITOLO ELABORATO	COMMESSA L344	LOTTO 00	CODIFICA R 07 RH	DOCUMENTO GN 00 00 001	REV. A	FOGLIO 47 di 79

4.4 Note per l'interpretazione dei dati e sviluppi futuri

I risultati delle analisi PSInSAR™ vengono abitualmente utilizzati a supporto dell'interpretazione geologica di fenomeni franosi, subsidenze o altri eventi caratterizzati da moti del terreno **lenti**.

Si ricorda che la tecnica interferometrica SAR consente di valutare variazioni di distanza sensore-bersaglio pari ad una frazione della lunghezza d'onda (per il presente progetto pari a 5.66 cm), ma eventuali "salti" di diversi centimetri vengono "equivocati" ovvero non è possibile "contare" il numero intero di lunghezze d'onda (cfr. paragrafo 4.4 *Manuale della Tecnica PSInSAR™*). Il limite teorico massimo di spostamento misurabile tra due acquisizioni successive è di 1.4 cm: in caso di movimenti più rapidi concentrati in pochi giorni (in generale in un tempo minore del tempo di rivisitazione del satellite) è possibile sottostimare il moto realmente avvenuto.

Lo studio congiunto del dato satellitare con altri dati rilevati al suolo consente una visione completa del fenomeno in atto e una più corretta interpretazione delle dinamiche in gioco.

Nelle analisi di strutture lineari come il tracciato in esame l'elevata densità di punti di misura risulta un parametro decisivo per la corretta interpretazione del fenomeno in atto: benché nel presente progetto siano già stati identificati oltre 65.000 PS esistono satelliti che, garantendo risoluzioni al suolo più elevate, assicurano un maggior numero di punti in fase di analisi PSInSAR™.

Nell'area in esame è possibile programmare le acquisizioni da parte dei satelliti di nuovissima generazione, TerraSAR-X e Cosmo Skymed, con risoluzioni fino al metro.

TITOLO ELABORATO	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	48 di 79

5 RAPPORTO TECNICO SULL'ANALISI CONDOTTA

5.1 Introduzione

La Tecnica PS (*Permanent Scatterers Technique* - PSInSARTM) è stata sviluppata e brevettata dal Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva a TRE, primo *spin-off* commerciale del Politecnico, nel 2000. Si tratta di uno strumento molto efficace per il monitoraggio ad alta precisione di fenomeni di deformazione della superficie terrestre, basato sull'impiego di serie temporali d'immagini radar satellitari.

I sistemi radar satellitari coerenti, e nello specifico i radar di tipo SAR (*Synthetic Aperture Radar*) utilizzati nella presente elaborazione, sono in grado di misurare la distanza tra il sensore e il bersaglio, registrando il tempo intercorso tra l'emissione dell'onda elettromagnetica e la ricezione del segnale retro-diffuso dal bersaglio stesso. Grazie alla loro periodicità di acquisizione (circa mensile) i dati SAR forniscono misure ripetute della distanza sensore-bersaglio. Il confronto della distanza misurata in istanti di tempo diversi consente di mettere in luce eventuali spostamenti.

La Tecnica PS si pone come obiettivo quello di sfruttare tutte le acquisizioni disponibili su una stessa area e individuare quei bersagli (*Permanent Scatterers*) che mantengono inalterate nel tempo le proprie caratteristiche elettromagnetiche. Per ciascuno di essi è possibile ricostruire la storia dei movimenti nell'intervallo di tempo analizzato con precisione millimetrica.

5.2 Metodologia

Il complesso di algoritmi che costituisce l'analisi PS consta di diverse fasi schematizzate in Figura 32.

Inizialmente si procede all'individuazione, all'interno degli archivi ERS (Agenzia Spaziale Europea, ESA), Envisat (ESA) o RADARSAT-1 (Agenzia Spaziale Canadese, CSA) del *dataset* di immagini più idoneo per eseguire l'analisi sull'area di interesse.

Successivamente, per ciascun *dataset* di immagini, viene selezionata l'immagine denominata *master*, che costituirà il riferimento temporale e geometrico per tutte le restanti immagini, denominate *slave*.

L'elaborazione procede con la fase di *focalizzazione* che consente di trasformare i dati grezzi (*raw*), ossia i dati così come sono stati acquisiti dal satellite, in matrici di numeri complessi, corrispondenti all'informazione di ampiezza e di fase del segnale. Segue l'operazione di *registrazione*, con la quale è possibile far corrispondere a pixel omologhi di immagini diverse le stesse celle di risoluzione al suolo. Si tratta di un'operazione fondamentale per consentire la generazione degli *interferogrammi differenziali*.

	LINEA AV/AC					
	PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste					
TITOLO ELABORATO	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	49 di 79

Il passo successivo è rappresentato dallo *studio delle statistiche* dei segnali di ampiezza e di fase, che consente l'individuazione di quei bersagli (pixel) candidati a divenire *Permanent Scatterers (PS Candidates)* grazie ai quali è possibile stimare e rimuovere il disturbo atmosferico di ciascuna immagine ed isolare il contributo legato esclusivamente al movimento degli elementi presenti sulla superficie terrestre.

Una volta effettuata la *stima degli spostamenti* su tutti i pixel che risultano avere un'elevata coerenza (ossia, un elevato rapporto segnale-rumore) si passa all'operazione finale di *geocodifica* dei risultati, che ne rende possibile il loro utilizzo nei comuni Sistemi Informativi Territoriali.

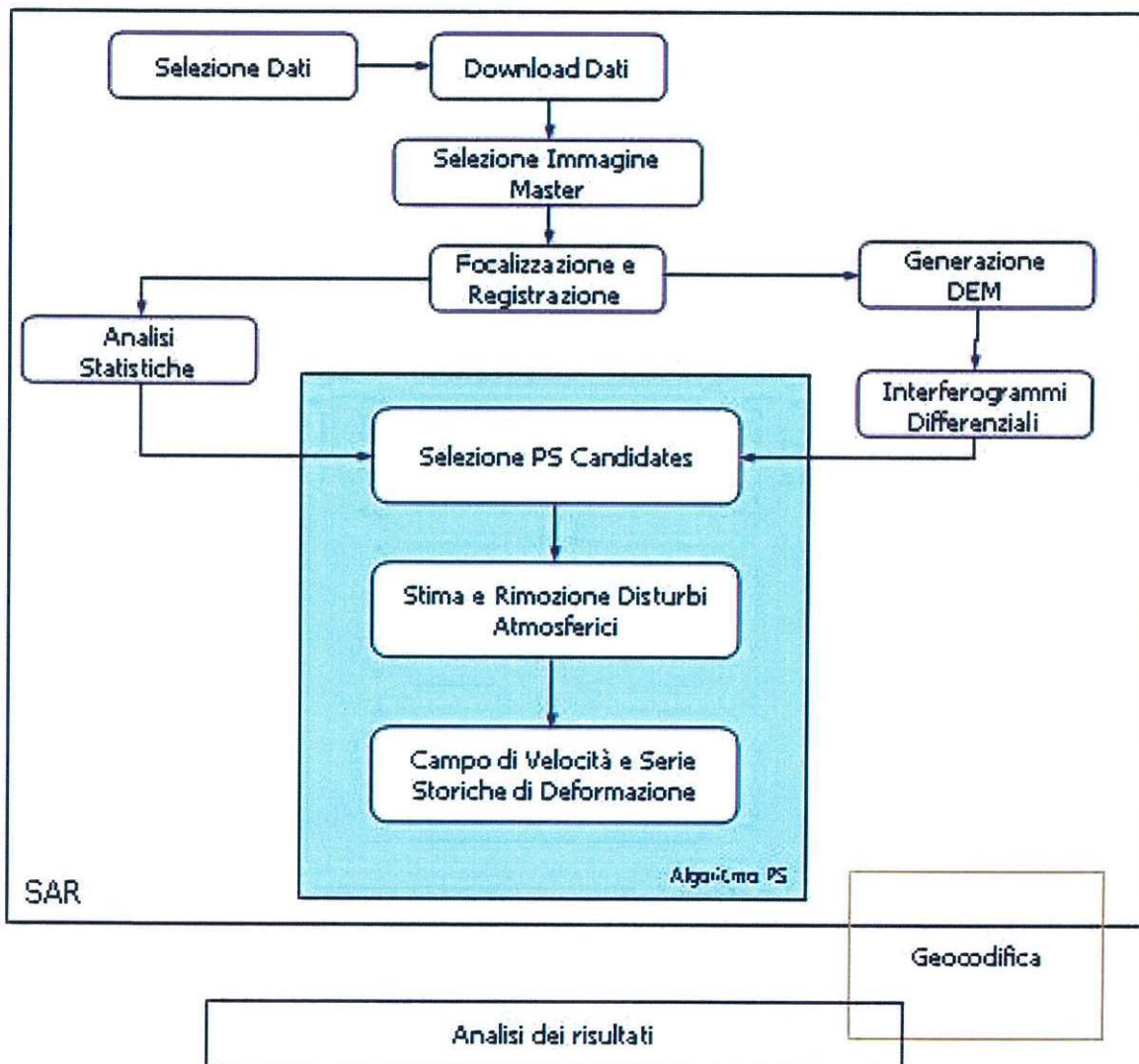


Figura 32: Fasi di elaborazione della Tecnica PS.

	LINEA AV/AC PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste					
	TITOLO ELABORATO	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	50 di 79

5.3 Selezione dei dati

Sull'area di interesse l'analisi degli archivi di immagini RADARSAT-1 e ERS1-2 ha portato all'individuazione rispettivamente della Track 254 e della Track 351 entrambe in geometria discendente.

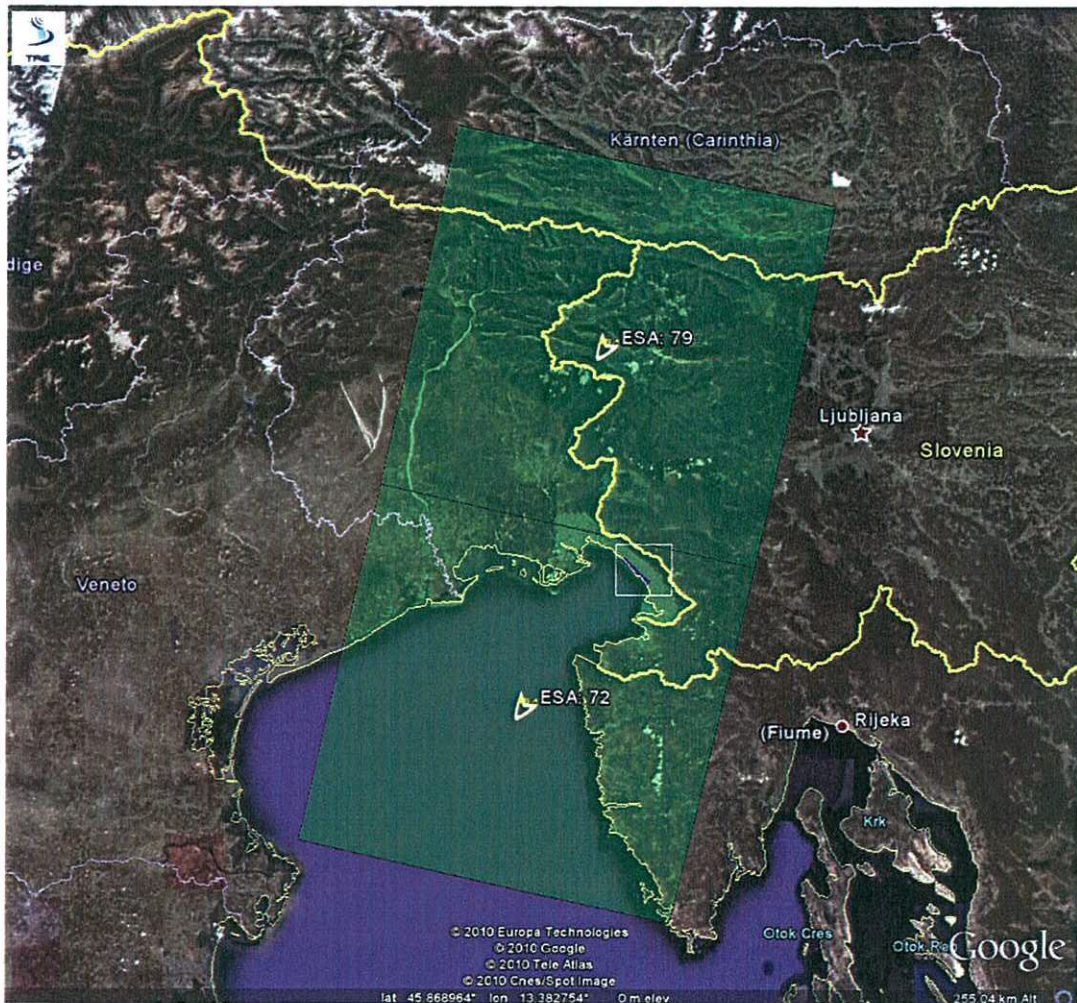


Figura 33: Copertura ERS Track 351

	LINEA AV/AC PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste					
	TITOLO ELABORATO	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	51 di 79



Figura 34: Copertura Radarsat Track 254

Si ricorda che ogni immagine radar è identificata dalla data di acquisizione e dal numero di Track corrispondente al numero d'orbita del satellite. Le geometrie di acquisizioni disponibili si distinguono in ascendente e discendente in funzione dei passaggi del sensore da sud verso nord o da nord verso sud rispettivamente. I dati sono acquisiti con cadenza variabile da sensore a sensore (*revisiting time*); in riferimento ai satelliti utilizzati nel presente progetto si ricorda che RADARSAT 1 ha un tempo di rivisitazione pari a 24 giorni e ERS pari a 35 giorni. Per i dettagli sulle immagini utilizzate nell'elaborazione si veda il capitolo 6.

5.4 Selezione dell'immagine *master*

L'immagine *master* risulta essere di grande importanza nell'analisi PS. La sua scelta è dettata principalmente dall'esigenza di minimizzare i cosiddetti fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica (cfr. Manuale della Tecnica PSInSAR™). In fase di processing si sceglie quindi come *master* l'immagine che minimizza il disturbo atmosferico e la dispersione dei *baseline temporali* e *geometrici* delle altre immagini del dataset, definite *slave*.

	LINEA AV/AC PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste					
TITOLO ELABORATO	COMMESSA L344	LOTTO 00	CODIFICA R 07 RH	DOCUMENTO GN 00 00 001	REV. A	FOGLIO 52 di 79

Il processo di “focalizzazione” di tutte le immagini e quello successivo di “registrazione” delle *slave* sulla griglia di riferimento della *master*, consentono di ottenere un dataset in cui a pixel omologhi di differenti immagini corrispondono omologhe celle di risoluzione al suolo, in modo tale che sia possibile procedere con confronti tra acquisizioni differenti.

Nel capitolo 6 sono riportati per ogni elaborazione il dettaglio delle immagini utilizzate e per ogni immagine viene fornito il valore del Baseline Normale (Bn) e del Baseline Temporale (Bt) riferiti all’immagine master di processing.

Si noti che in fase di post-processing, per consentire una lettura del dato più agevole, l’origine delle serie storiche di spostamento viene posta nella prima data di acquisizione del dataset.

5.5 Mappe di riflettività dell’area di interesse

Ogni pixel che compone un’immagine SAR contiene l’informazione di **ampiezza**, funzione della quantità di segnale retro-diffuso dal bersaglio a terra e ricevuto dal sensore, e l’informazione di **fase**, funzione della distanza tra sensore e bersaglio a terra (lunghezza del cammino ottico compiuto dall’onda elettromagnetica).

Ad ogni pixel corrisponde una cella di risoluzione a terra che, nel caso dei satelliti utilizzati, misura circa 20 metri nella direzione Est-Ovest e circa 5 metri in quella Nord-Sud.

Nelle figure seguenti si riportano le immagini satellitari di ampiezza (medie incoerenti) dei siti elaborati: si noti che le immagini non sono state georeferenziate, ovvero l’asse orizzontale corrisponde alla direzione detta di *azimuth* (parallela all’orbita del sensore) mentre quello verticale corrisponde alla coordinata detta di *range* (approssimativamente direzione Est-Ovest).

Nell’immagine radar le superfici relativamente lisce rispetto alla lunghezza d’onda del sensore (per i satelliti Radarsat circa 5,3 cm) come strade, laghi, fiumi, appaiono scure perché si comportano come specchi non orientati verso l’antenna ricevente, quindi la porzione del segnale illuminante retrodiffusa verso il satellite è sensibilmente ridotta.

Le strutture metalliche, i manufatti e le rocce esposte che hanno un profilo irregolare possono invece restituire al sensore una porzione significativa dell’energia incidente e quindi dare luogo a pixel molto luminosi.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	53 di 79

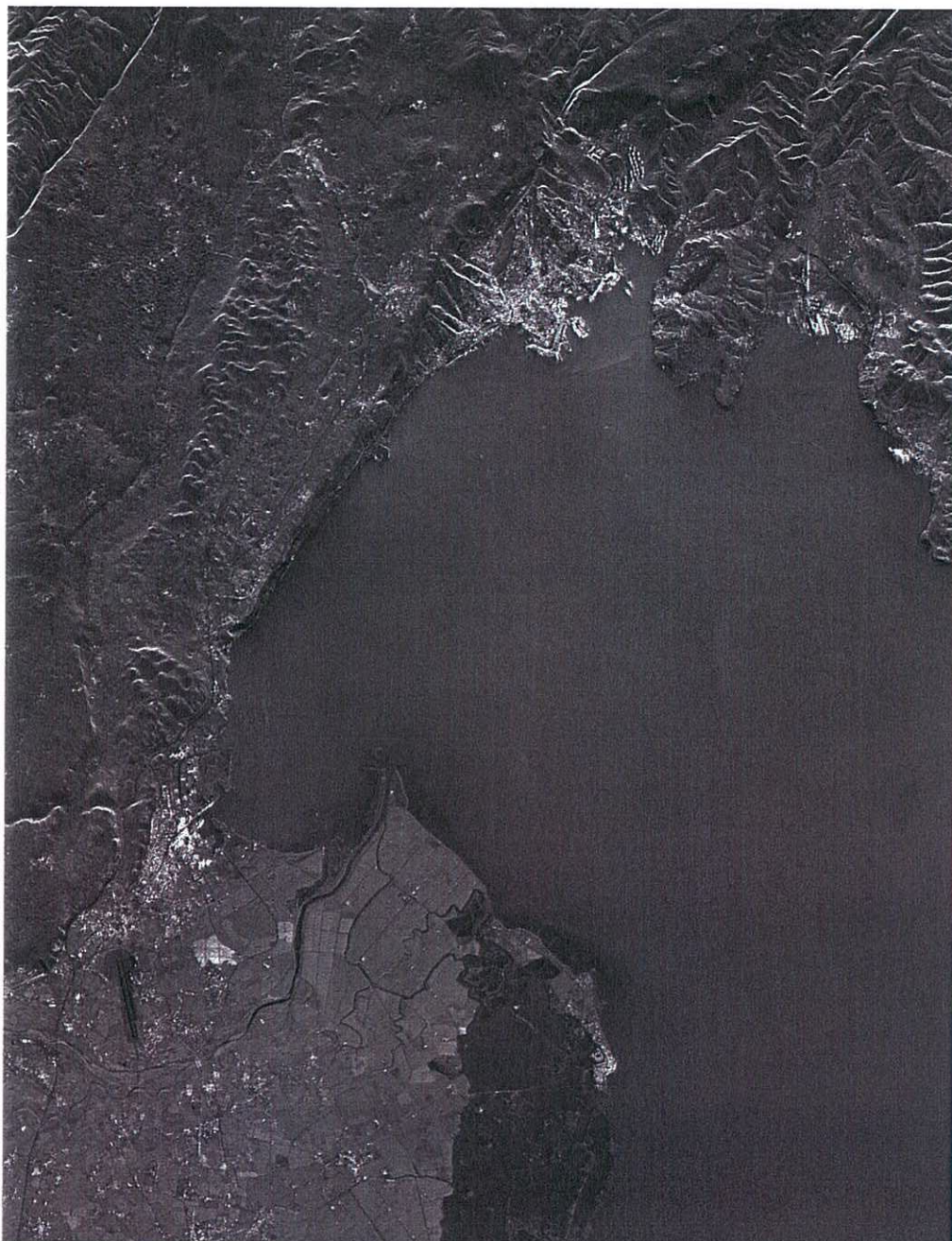


Figura 35: Mappa di riflettività multi immagine del sito di Trieste ERS discendente. Il nord è a sinistra della scena.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	54 di 79



Figura 36: Mappa di riflettività multi immagine del sito di Trieste RSAT-1 S3 discendente. Il nord è a sinistra della scena.

	LINEA AV/AC PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste					
	TITOLO ELABORATO	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	55 di 79

5.6 Analisi interferometrica

Come già introdotto nella sezione precedente a ciascun pixel dell'immagine SAR è associata sia l'informazione di ampiezza sia quella di fase.

La fase interferometrica consta di varie componenti:

- riflettività del bersaglio,
- contributo atmosferico,
- rumore di fondo del sistema,
- distanza sensore-bersaglio (comprensiva sia della componente dovuta al movimento del bersaglio al suolo sia della topografia locale).

Il fatto di poter disporre di immagini SAR acquisite sulla stessa area in istanti di tempo differenti consente di studiare l'evoluzione del termine di fase nel tempo, operando un confronto tra acquisizioni successive. La generazione degli interferogrammi differenziali avviene proprio tramite il confronto tra la fase dell'immagine *master* e la fase di tutte le immagini *slave*, ricampionate sullo stesso reticolo della *master*. Quindi, a partire da un dataset con N immagini, si ottengono N-1 differenziali.

L'informazione che si ottiene dagli interferogrammi differenziali racchiude diversi contributi legati al movimento dell'oggetto a terra, alla topografia locale ed alla presenza dell'atmosfera. L'obiettivo dell'analisi PSInSAR™ è individuare quei punti, detti *Permanent Scatterers*, che mantengono la propria "firma elettromagnetica" costante nel tempo, indipendentemente dalla posizione del sensore radar (baseline geometrico) e dal momento dell'acquisizione (baseline temporale). L'individuazione di questi capisaldi radar permette di stimare ed isolare i vari contributi della fase interferometrica ed in particolare il termine legato al movimento subito dal bersaglio a terra nel periodo di acquisizione, essenziale per ricostruire il campo degli spostamenti e delle velocità fornito dalla tecnica PSInSAR™. Per approfondimenti si rimanda all'appendice alla bibliografia sulla tecnica.

5.7 La tecnica PSInSAR™

Il cuore dell'algoritmo della tecnica PSInSAR™ consiste nella stima e rimozione del contributo atmosferico presente in ogni immagine in modo da estrarre le informazioni sul moto dei *Permanent Scatterers* (per maggiori dettagli cfr. *Manuale della Tecnica PSInSAR™*).

I *Permanent Scatterers* (PS) corrispondono ad elementi già presenti al suolo, identificabili generalmente con manufatti (ad esempio, edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, elementi metallici) oppure corpi naturali (ad esempio, affioramenti rocciosi, coni o falde detritiche), che si distinguono dagli altri, presenti nell'area esaminata, per il fatto di possedere un'elevata stabilità nel tempo della cosiddetta "firma radar" (a differenza invece della vegetazione che muta continuamente).

	LINEA AV/AC					
	PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste					
TITOLO ELABORATO	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	56 di 79

Le informazioni basilari associate a ciascun PS, raccolte in file digitali (in formato *shape*), sono:

1. la posizione del bersaglio a terra, ovvero le sue coordinate spaziali (latitudine/est, longitudine/nord, quota);
2. la velocità media annua di spostamento (misurata lungo la congiungente sensore-bersaglio; *Line Of Sight, LOS*), espressa in mm/anno, calcolata nell'intervallo di acquisizione delle immagini elaborate ed in relazione ad un punto preso come riferimento;
3. la serie storica di spostamento, ossia una funzione discreta di punti che rappresenta, acquisizione per acquisizione, l'evoluzione dello spostamento subito da ciascun PS, espresso in mm e misurato nella direzione di vista del sistema (LOS).

Il parametro che descrive la qualità delle misure effettuate è la "coerenza", indice normalizzato tra 0 e 1 che risulta ora essere legato anche alla deviazione standard del rumore di fase del punto. La coerenza è funzione del numero di immagini elaborate e della distribuzione dei baseline temporali e spaziali.

Un punto è considerato attendibile se il valore di coerenza associato è tale da garantire una probabilità di falso allarme inferiore a 10^{-5} per le analisi "Regional" o "Linear" e 10^{-4} per le analisi "Local". Per falso allarme si intende la possibilità che una sequenza di rumore venga interpretata come movimento.

5.8 Analisi SqueeSAR™

A distanza di dieci anni dal brevetto PSInSAR™, **TRE ha sviluppato un nuovo algoritmo proprietario, SqueeSAR™**, che rappresenta un ulteriore traguardo nel campo dell'interferometria e una soluzione avanzata per il monitoraggio di tutte le aree extra-urbane, dove la densità delle misure PS può talvolta risultare non soddisfacente. L'innovazione consiste nell'aver individuato una nuova famiglia di "bersagli" monitorabili da satellite, i cosiddetti **Distributed Scatterer** o **DS**, che si vanno ad aggiungere ai PS.

I dati, in un'immagine radar, provengono da bersagli di varia natura a terra, pertanto le caratteristiche elettromagnetiche possono variare significativamente anche tra pixel adiacenti di una stessa immagine. E' possibile classificare i pixel dell'immagine in due famiglie di bersagli: i bersagli puntiformi, che caratterizzano un solo pixel, o al più pochi altri pixel ad esso connessi, e i bersagli distribuiti, che caratterizzano tutto un gruppo di pixel, e che generano caratteristiche pressoché identiche del segnale radar riflesso. I primi rappresentano i già noti PS, mentre i secondi costituiscono la nuova famiglia dei DS (Figura 37).

A differenza di un target puntiforme, dove l'energia retro-diffusa verso il sensore risulta elevata e concentrata in un'area molto ridotta, l'intensità dell'eco radar per un pixel appartenente a un DS è solitamente meno forte, perché manca un bersaglio dominante. D'altra parte, l'utilizzo congiunto di tutti i pixel appartenenti al DS permette di ridurre il rumore presente nei dati, migliorando in modo significativo la qualità della stima, tanto che le serie storiche di movimento di un DS appaiono meno rumorose.

Esempi di target distribuiti, che possono beneficiare del nuovo approccio SqueeSAR™, sono le aree detritiche, i campi non coltivati, le aree desertiche non sabbiose.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	57 di 79

All'interno del database i punti PS e DS vengono distinti tramite il campo 'Area Effettiva' (Eff_Area) che indica l'estensione dell'area associata a ciascun DS in m². Per i PS questo valore è zero.

E' importante sottolineare come il nuovo approccio di analisi contenga in sé anche la catena di processing delle misure PS. Questo significa che i PS continueranno a esistere accanto ai DS. Quindi più misure e maggiore informazione per tutte quelle aree finora non accessibili al monitoraggio satellitare.

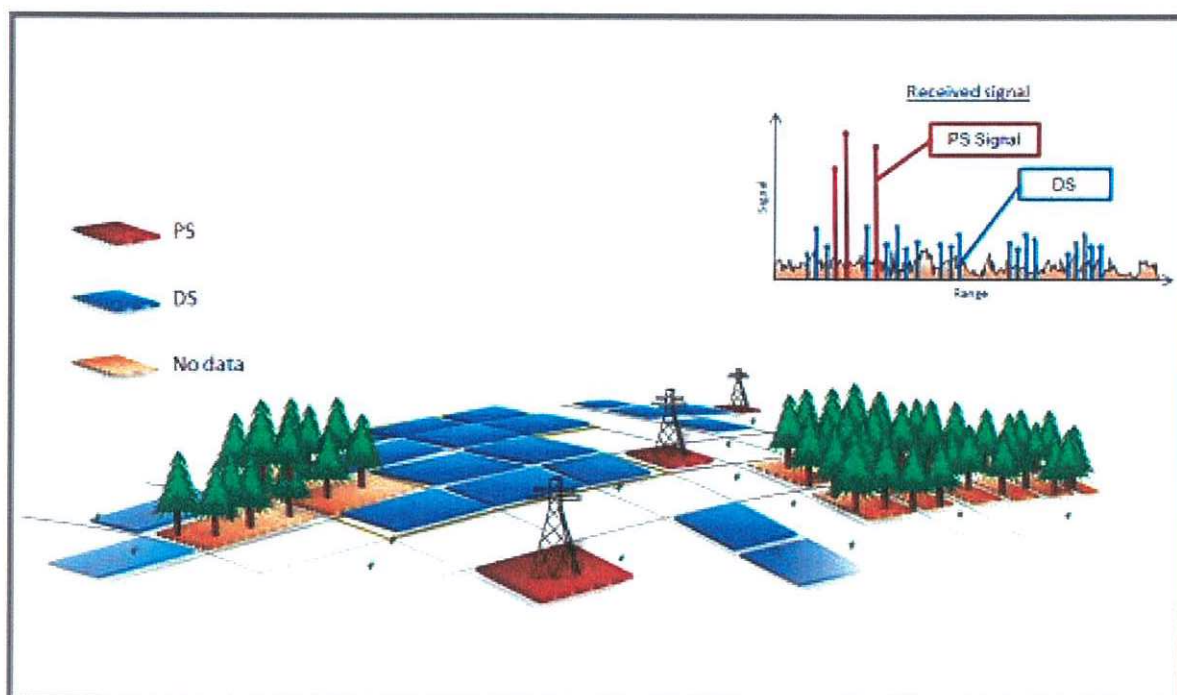


Figura 37: Schema base analisi SqueeSAR™.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	58 di 79

6 DATI ANCILLARI ALL'ELABORAZIONE

6.1 Dataset ERS 1992-2000 - TRACK: 351

Id	Data	Satellite	Bn [^]	Bt [giorni]
1	21/4/1992	ERS1	0.4	-1984
2	26/5/1992	ERS1	-0.44	-1949
3	4/8/1992	ERS1	0.07	-1879
4	8/9/1992	ERS1	0.39	-1844
5	13/10/1992	ERS1	0.36	-1809
6	17/11/1992	ERS1	-0.14	-1774
7	26/1/1993	ERS1	-0.12	-1704
8	6/4/1993	ERS1	0.56	-1634
9	15/6/1993	ERS1	-0.24	-1564
10	20/7/1993	ERS1	-0.21	-1529
11	2/11/1993	ERS1	0.49	-1424
12	7/12/1993	ERS1	0.64	-1389
13	30/3/1995	ERS1	-0.59	-911
14	8/6/1995	ERS1	-0.02	-841
15	13/7/1995	ERS1	-0.19	-806

TITOLO ELABORATO

COMMESSA L344	LOTTO 00	CODIFICA R 07 RH	DOCUMENTO GN 00 00 001	REV. A	FOGLIO 59 di 79
------------------	-------------	---------------------	---------------------------	-----------	--------------------

16	18/8/1995	ERS2	0.12	-770
17	21/9/1995	ERS1	-0.16	-736
18	26/10/1995	ERS1	0.64	-701
19	27/10/1995	ERS2	0.69	-700
20	4/1/1996	ERS1	0.22	-631
21	14/3/1996	ERS1	0.33	-561
22	15/3/1996	ERS2	0.3	-560
23	18/4/1996	ERS1	0.42	-526
24	19/4/1996	ERS2	0.35	-525
25	23/5/1996	ERS1	0.05	-491
26	24/5/1996	ERS2	-0.02	-490
27	27/6/1996	ERS1	0.18	-456
28	28/6/1996	ERS2	0.09	-455
29	2/8/1996	ERS2	0.17	-420
30	6/9/1996	ERS2	-0.21	-385
31	11/10/1996	ERS2	-0.17	-350
32	15/11/1996	ERS2	0.98	-315

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	60 di 79

33	20/12/1996	ERS2	-0.25	-280
34	28/2/1997	ERS2	0.03	-210
35	9/5/1997	ERS2	-0.07	-140
36	18/7/1997	ERS2	-0.03	-70
37	22/8/1997	ERS2	0.3	-35
(M) 38	26/9/1997	ERS2	0	0
39	31/10/1997	ERS2	-0.54	35
40	5/12/1997	ERS2	0.25	70
41	9/1/1998	ERS2	-0.08	105
42	20/3/1998	ERS2	0.1	175
43	24/4/1998	ERS2	0.23	210
44	29/5/1998	ERS2	0.1	245
45	3/7/1998	ERS2	-0.43	280
46	6/8/1998	ERS1	0.39	314
47	7/8/1998	ERS2	0.05	315
48	11/9/1998	ERS2	-0.01	350
49	16/10/1998	ERS2	-0.1	385

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	61 di 79

50	20/11/1998	ERS2	0.21	420
51	25/12/1998	ERS2	-0.14	455
52	4/3/1999	ERS1	-0.6	524
53	5/3/1999	ERS2	-0.73	525
54	9/4/1999	ERS2	0.42	560
55	14/5/1999	ERS2	0.33	595
56	18/6/1999	ERS2	-0.12	630
57	23/7/1999	ERS2	0.5	665
58	27/8/1999	ERS2	-0.77	700
59	1/10/1999	ERS2	0.3	735
60	5/11/1999	ERS2	-0.14	770
61	13/1/2000	ERS1	-0.66	839
62	14/1/2000	ERS2	-0.54	840
63	17/2/2000	ERS1	-0.32	874
64	18/2/2000	ERS2	-0.29	875
65	28/4/2000	ERS2	0.45	945
66	2/6/2000	ERS2	-0.08	980

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	62 di 79

67	7/7/2000	ERS2	-0.2	1015
68	11/8/2000	ERS2	0.34	1050
69	15/9/2000	ERS2	0.01	1085
70	20/10/2000	ERS2	0.12	1120
71	24/11/2000	ERS2	0.67	1155
72	29/12/2000	ERS2	-0.26	1190

^ Frazione del baseline critico (M) Master Image

Nome Sito	TRIESTE_ERS_D_T351_2673_ITALFERR_SC69567
Cliente	ITALFERR S.p.A
Codice Documento	JO09-0075-REP1.0
Responsabile del Processing	Davide Colombo
Responsabile del Post Processing	Chiara Giannico
Responsabile Commessa	Stefano Cespa

Data Ultimazione lavori	03/02/2010
Software utilizzato	PSproc
Versione	3.2
Prodotto	Linear

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	63 di 79

Satellite utilizzato	ERS1 ERS2
Geometria di acquisizione	DESCENDING
Baseline critico [m]	1286.86047601
Pulse repetition frequency [Hz]	1679.902343800000
Numero di scene utilizzate	72
Intervallo temporale di analisi	21/4/1992 - 29/12/2000
Master acquisition UTC Time	9:56:35

Layer utilizzato per la georeferenziazione	DWG fornite dal cliente
Sistema di proiezione	Monte_Mario_Italy_2
Coordinate del punto di riferimento	NORTH: 5062394.16 EAST: 2421333.5809
Estensione dell'area di interesse	24.2 Km ²
Numero di PS identificati	29646
False alarm rate	10 ⁻⁰⁵

6.1.1 Geometria di acquisizione

Coordinate del versore di puntamento (LOS – Line Of Sight)	N: -0.08618	E: 0.35247	H: 0.93185
Angoli di puntamento	Θ: 13.74		δ: 21.27

TITOLO ELABORATO

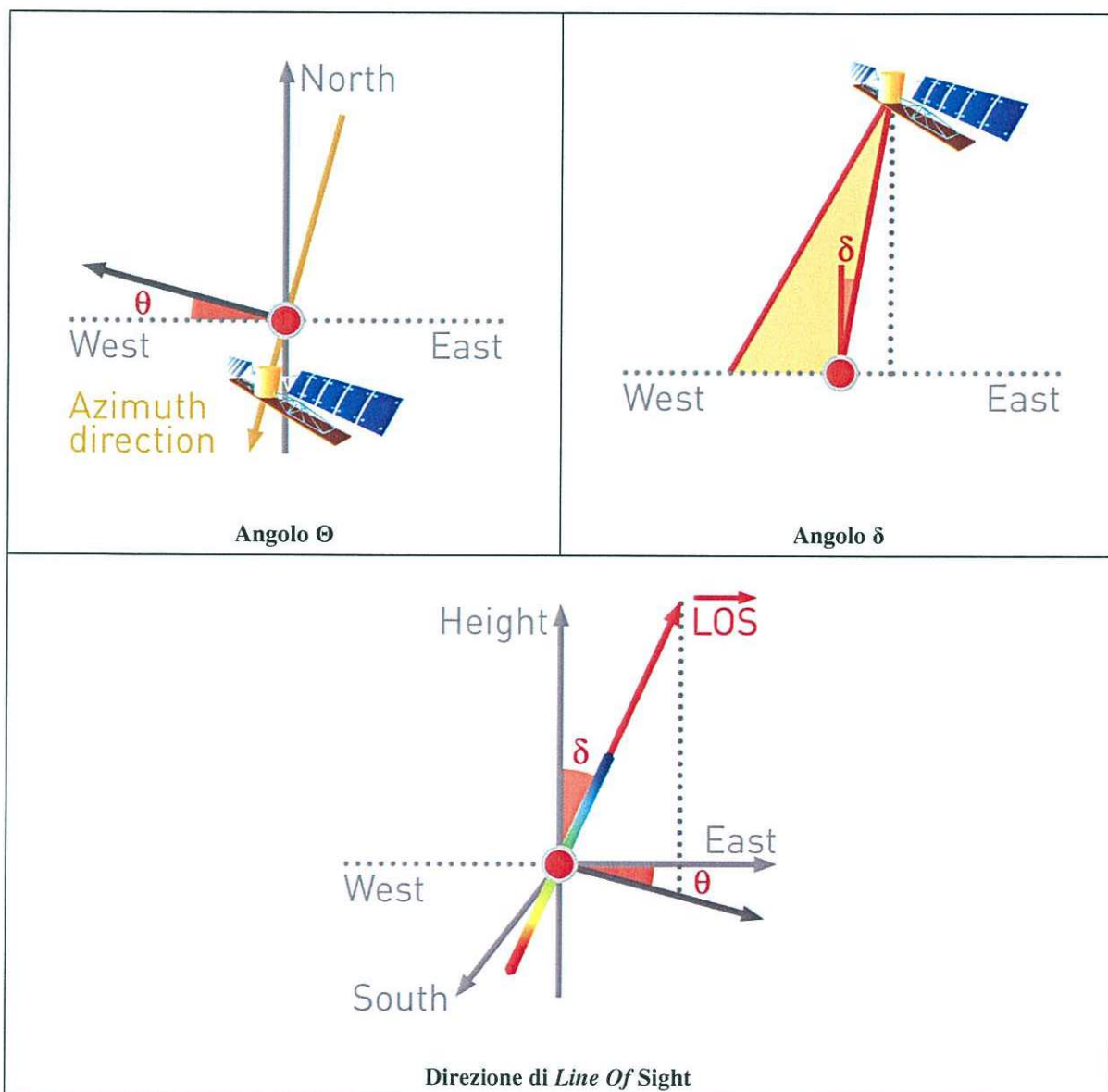
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	64 di 79

File consegnati

TRIESTE_ERS_D_T351_2673_ITALFERR_GBE-TSR.shp

TRIESTE_ERS_D_T351_2673_ITALFERR_GBE-REF.shp

TRIESTE_ERS_D_T351_2673_ITALFERR_GBE-MET.shp



TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	65 di 79

6.2 Dataset Radarsat 2003-2009 - TRACK: 254

Id	Data	Satellite	Bn [^]	Bt [giorni]
1	15/3/2003	RSAT-S3	0.31	-1056
2	8/4/2003	RSAT-S3	-0.05	-1032
3	2/5/2003	RSAT-S3	-0.14	-1008
4	26/5/2003	RSAT-S3	0.01	-984
5	19/6/2003	RSAT-S3	0.23	-960
6	13/7/2003	RSAT-S3	-0.25	-936
7	6/8/2003	RSAT-S3	-0.09	-912
8	23/9/2003	RSAT-S3	-0.02	-864
9	17/10/2003	RSAT-S3	-0.13	-840
10	10/11/2003	RSAT-S3	-0.08	-816
11	4/12/2003	RSAT-S3	-0.21	-792
12	29/12/2003	RSAT-S3	0.18	-768
13	21/1/2004	RSAT-S3	0.11	-744
14	14/2/2004	RSAT-S3	-0.27	-720
15	2/4/2004	RSAT-S3	-0.08	-672
16	26/4/2004	RSAT-S3	-0.09	-648

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	66 di 79

17	7/7/2004	RSAT-S3	-0.16	-576
18	31/7/2004	RSAT-S3	-0.2	-552
19	24/8/2004	RSAT-S3	-0.25	-528
20	17/9/2004	RSAT-S3	-0.05	-504
21	11/10/2004	RSAT-S3	-0.24	-480
22	4/11/2004	RSAT-S3	-0.33	-456
23	29/11/2004	RSAT-S3	0.28	-432
24	22/12/2004	RSAT-S3	-0.22	-408
25	15/1/2005	RSAT-S3	0.15	-384
26	4/3/2005	RSAT-S3	-0.6	-336
27	29/3/2005	RSAT-S3	-0.12	-312
28	21/4/2005	RSAT-S3	0.07	-288
29	15/5/2005	RSAT-S3	-0.27	-264
30	2/7/2005	RSAT-S3	-0.16	-216
31	26/7/2005	RSAT-S3	0.28	-192
32	19/8/2005	RSAT-S3	-0.42	-168
33	12/9/2005	RSAT-S3	0	-144

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	67 di 79

34	6/10/2005	RSAT-S3	-0.27	-120
35	23/11/2005	RSAT-S3	-0.05	-72
36	17/12/2005	RSAT-S3	-0.31	-48
37	10/1/2006	RSAT-S3	0.03	-24
(M) 38	3/2/2006	RSAT-S3	0	0
39	27/2/2006	RSAT-S3	-0.34	24
40	23/3/2006	RSAT-S3	0.03	48
41	16/4/2006	RSAT-S3	-0.35	72
42	10/5/2006	RSAT-S3	0.01	96
43	3/6/2006	RSAT-S3	0.11	120
44	27/6/2006	RSAT-S3	0.04	144
45	21/7/2006	RSAT-S3	0.01	168
46	14/8/2006	RSAT-S3	-0.28	192
47	7/9/2006	RSAT-S3	0.07	216
48	1/10/2006	RSAT-S3	-0.53	240
49	25/10/2006	RSAT-S3	-0.12	264
50	18/11/2006	RSAT-S3	-0.01	288

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	68 di 79

51	12/12/2006	RSAT-S3	-0.38	312
52	5/1/2007	RSAT-S3	0.22	336
53	29/1/2007	RSAT-S3	-0.49	360
54	22/2/2007	RSAT-S3	-0.03	384
55	18/3/2007	RSAT-S3	-0.15	408
56	11/4/2007	RSAT-S3	-0.59	432
57	5/5/2007	RSAT-S3	0.18	456
58	29/5/2007	RSAT-S3	-0.41	480
59	22/6/2007	RSAT-S3	0.31	504
60	16/7/2007	RSAT-S3	-0.37	528
61	9/8/2007	RSAT-S3	0.04	552
62	20/10/2007	RSAT-S3	-0.11	624
63	13/11/2007	RSAT-S3	-0.3	648
64	24/1/2008	RSAT-S3	-0.5	720
65	17/2/2008	RSAT-S3	0.03	744
66	12/3/2008	RSAT-S3	-0.51	768
67	5/4/2008	RSAT-S3	0.03	792

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	69 di 79

68	29/4/2008	RSAT-S3	-0.17	816
69	23/5/2008	RSAT-S3	0.04	840
70	16/6/2008	RSAT-S3	-0.1	864
71	10/7/2008	RSAT-S3	-0.1	888
72	3/8/2008	RSAT-S3	-0.04	912
73	27/8/2008	RSAT-S3	-0.69	936
74	20/9/2008	RSAT-S3	-0.05	960
75	7/11/2008	RSAT-S3	-0.1	1008
76	1/12/2008	RSAT-S3	-0.36	1032
77	25/12/2008	RSAT-S3	-0.09	1056
78	18/1/2009	RSAT-S3	-0.04	1080
79	11/2/2009	RSAT-S3	-0.45	1104
80	7/3/2009	RSAT-S3	-0.18	1128
81	31/3/2009	RSAT-S3	-0.09	1152
82	24/4/2009	RSAT-S3	-0.39	1176
83	5/7/2009	RSAT-S3	0.43	1248
84	29/7/2009	RSAT-S3	-0.34	1272



LINEA AV/AC
PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	70 di 79

85	22/8/2009	RSAT-S3	-0.24	1296
----	-----------	---------	-------	------

^ Frazione del baseline critico (M) Master Image

Data	Satellite	Bn^	Bt [giorni]	Motivazione
11/6/2009		None		Normal baseline too high (Bn = 2516.93 [m]).

^ Frazione del baseline critico

Nome Sito	TRIESTE_RSAT_S3_D_T254_0_ITALFERR
Cliente	ITALFERR S.p.A
Codice Documento	JO09-0075-REP1.0
Responsabile del Processing	Davide Colombo
Responsabile del Post Processing	Chiara Giannico
Responsabile Commessa	Stefano Cespa

Data Ultimazione lavori	26/02/2010
Software utilizzato	PSproc
Versione	3.2
Prodotto	Linear
Satellite utilizzato	RSAT-S3
Geometria di acquisizione	DESCENDING



LINEA AV/AC
PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	71 di 79

Baseline critico [m]	1824.96755186
Pulse repetition frequency [Hz]	1353.314022444442
Numero di scene utilizzate	85
Intervallo temporale di analisi	15/3/2003 - 22/8/2009
Master acquisition UTC Time	5:13:34

Layer utilizzato per la georeferenziazione	DWG fornite dal cliente
Sistema di proiezione	Monte_Mario_Italy_2
Coordinate del punto di riferimento	NORTH: 5062313.5395 EAST: 2421369.4797
Estensione dell'area di interesse	24.11 Km ²
Numero di PS identificati	15631
False alarm rate	10 ⁻⁰⁵

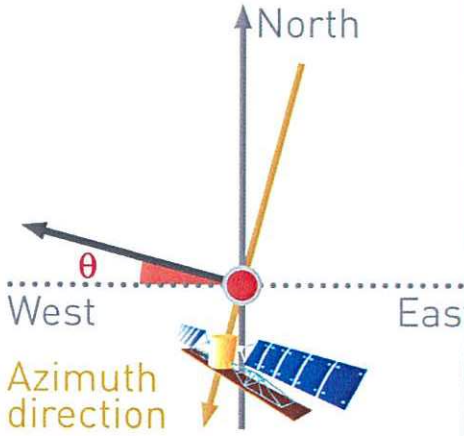
6.2.1 Geometria di acquisizione

Coordinate del versore di puntamento (LOS - Line Of Sight)	N: -0.11603	E: 0.55630	H: 0.82284
Angoli di puntamento	Θ: 11.78		δ: 34.63
File consegnati	TRIESTE_RSAT_S3_D_T254_ITALFERR_GBE-TSR.shp TRIESTE_RSAT_S3_D_T254_ITALFERR_GBE-REF.shp		

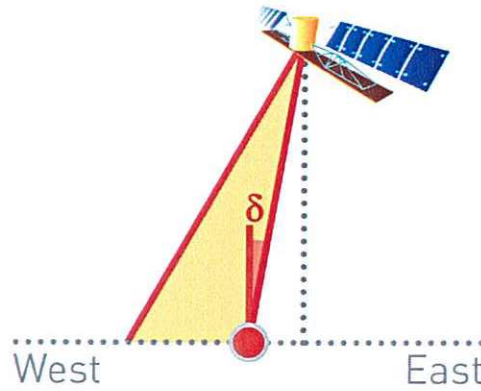
TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	72 di 79

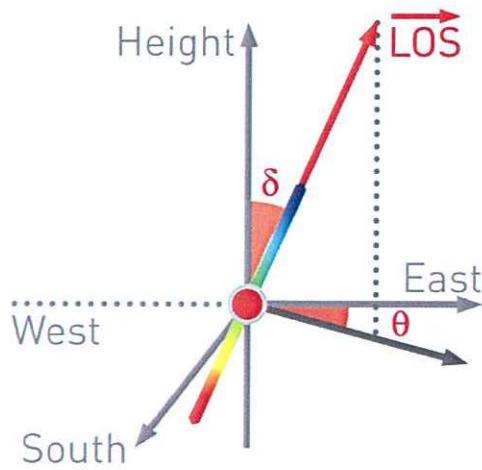
TRIESTE_RSAT_S3_D_T254_ITALFERR_GBE-MET.shp



Angolo Θ



Angolo δ



Direzione di *Line Of Sight*

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	73 di 79

7 CONCLUSIONI

L'analisi satellitare PSInSAR™, avanzato algoritmo di elaborazione dei segnali che permette il monitoraggio ad alta precisione di fenomeni di deformazione della superficie terrestre mediante l'utilizzo di immagini radar satellitari, è stata condotta sull'area di studio (Progetto Preliminare nuova linea Ronchi-Trieste Progressiva 0 - Progressiva 10).

L'elaborazione nel suo complesso è stata condotta con **157 immagini satellitari** acquisite sull'area Ronchi-Trieste nel periodo 1992-2009 ed ha consentito di individuare oltre **65.000 punti di misura** per ciascuno dei quali sono state calcolate posizione, velocità media annua e quota. Per circa **30.000** punti nelle immediate vicinanze del tracciato di progetto sono state inoltre calcolate le serie storiche di spostamento.

L'analisi degli spostamenti rilevati da satellite ha fornito le seguenti indicazioni:

- le velocità di spostamento evidenziano una sostanziale **stabilità lungo tutto il tracciato di progetto** ad eccezione di alcune singolarità da studiare nel dettaglio (cfr. 4.3.2-4.3.5);
- Da un primo confronto tra le misure di spostamento e il catalogo frane della regione Friuli Venezia Giulia si è osservato che alcuni fenomeni risultavano attivi nel periodo 1992-2000 e altri nel periodo 2003-2009. Tali fenomeni sono concentrati lungo la fascia costiera a distanza di diverse centinaia di metri dalla linea di progetto;
- Il catalogo frane disponibile on-line fornisce solo indicazioni generali sull'estensione areale dei fenomeni e sulla loro tipologia: la disponibilità di informazioni inedite (PS) sul grado di attività dei fenomeni franosi presenti nell'area consente di integrare le conoscenze disponibili.

In generale i risultati dell'analisi PSInSAR™ mostrano una complementarietà con le misure topografiche tradizionali a terra, aumentando la densità dei punti di misura e fornendo informazioni sui movimenti storici. Una peculiarità delle tecniche di telerilevamento inoltre è quella di offrire una visione sinottica dei fenomeni in atto fornendo misure omogenee su vaste aree: è così possibile evidenziare la presenza di movimenti anche su strutture esterne al tracciato ma ad esso correlate e quindi potenzialmente sensibili.

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	74 di 79

Allegato 1: Bibliografia e riferimenti alla tecnica PSInSAR™

Bibliografia tecnica

Permanent Scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer system response to groundwater pumping and artificial recharge

J. W. Bell, F. Amelung, A. Ferretti, M. Bianchi, F. Novali

Water Resources Research, Vol. 44, February 2008, pages 1-18.

On the use of quasi-static deformation to understand reservoir fluid flow

Don W. Vasco, A. Ferretti

Geophysics, Vol. 70, N. 4, July-August 2005, pp. 13-27.

Higher Order Permanent Scatterers Analysis

Alessandro Ferretti, Marco Bianchi, Claudio Prati, Fabio Rocca

submitted to EURASIP-Journal On Applied Signal Processing, Pages 1-30

Evaluating the effect of the observation time on the distribution of SAR Permanent Scatterers

Alessandro Ferretti, Carlo Colesanti, Daniele Perissin, Claudio Prati, Fabio Rocca

FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-5

L-band PS analysis: JERS-1 results and TerraSAR - L predictions

Fabio Rocca, Kenji Daito, Alessandro Ferretti, Shigeki Kuzuoka, and Fabrizio Novali

FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-6

3D motion recovery from multiangle and/or left right interferometry

Prof. Fabio Rocca

FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-5

Generation of DEM with sub-metric vertical accuracy from 30' ERS-ENVISAT pairs

Dr Claudio Prati, Dr Carlo Colesanti, Dr Alessandro Ferretti, and Dr Fabio Rocca

FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-5

Permanent Scatterers: Precision Assessment and Multi-platform Analysis

C. Colesanti, A. Ferretti, R. Locatelli, F. Novali, G. Savio

IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3



LINEA AV/AC
PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	75 di 79

ERS-ENVISAT Permanent Scatterers Interferometry

C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, D. Perissin, F. Rocca

IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3

Multi-Image Satellite SAR Interferometry: State of the Art and Future Trends

C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca

Paper for the Australian International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 3-5 September 2003, Pages 1-6

SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique

Carlo Colesanti, Alessandro Ferretti, Fabrizio Novali, Claudio Prati, Fabio Rocca

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, NO 7, July 2003, Pages 1685-1701

Deformation Monitoring by Satellite Radar Interferometry

Ferretti, R. Hanssen

GIM International, The Worldwide Magazine for Geomatics, Vol. 16, NO. 9, September 2002, Pages 52 - 57

Full Exploitation of the ERS Archive: Multi Data Set Permanent Scatterers Analysis

Colesanti, C. Prati, F. Rocca, A. Ferretti

Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2002, Toronto (Canada) 24-28 June 2002, VOL. 2, Pages 1234-1236, 2002

Ground Deformation Monitoring Exploiting SAR Permanent Scatterers

Colesanti, R. Locatelli, F. Novali

Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2002, Toronto (Canada) 24-28 June 2002, VOL. 2, Pages 1219-1221, 2002

Permanent Scatterers in SAR Interferometry

Alessandro Ferretti, Claudio Prati, and Fabio Rocca

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, NO. 1, January 2001, Pages 8 - 20

Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry

Alessandro Ferretti, Claudio Prati, and Fabio Rocca

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, NO. 5, September 2000, Pages 2202 - 2212

Non-Uniform Motion Monitoring Using the Permanent Scatterers Technique

Ferretti A., Prati C., Rocca F.

Proceedings FRINGE99 - 10 12 November 1999, Liège, Belgium, Pages 1-6



LINEA AV/AC
PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	76 di 79

Monitoring Terrain Deformations Using Multi-Temporal SAR Images

Ferretti A., Prati C., Rocca F.

Proceedings CEOS99 (Committee on Earth Observation Satellites) 26-29 October 1999 - Toulouse, France, Pages 1-4

Diameters of the Orbital Tubes in Long-Term Interferometric SAR Surveys

Fabio Rocca

IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters; Vol. 1, N. 3, July 2004; pages 224-227

Bibliografia sulle applicazioni PSInSAR™

Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis

R. Burgmann, G. Hilley, A. Ferretti, F. Novali

Geology, March 2006, Volume 34, N. 3, pp. 221-224.

Subsidence and flooding in New Orleans

T.H. Dixon, F. Amelung, A. Ferretti, F. Novali, F. Rocca, R. Dokkas, G. Sella, S.W. Kim, S. Wdowinski, D. Whitman

Nature, Vol 441, June 2006, pages 587-588.

Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project.

P. Farina, D. Colombo, A. Fumagalli, F. Marks, S. Moretti.

Engineering Geology 88, 2006; Pages 200-217

Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers Technique – a case study in the east of France

C. Colesanti; S. Le Mouelic; M. Bennani; D. Raucoules; C. Carnec; A. Ferretti

International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, No. 1, 10 January 2005; Pages 201-207

Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis

George E. Hilley, Roland Bürgmann, Alessandro Ferretti, Fabrizio Novali and Fabio Rocca

SCIENCE MAGAZINE, 25 June 2004, Volume 304, Number 5679, Pages 1952-1955

InSAR Permanent Scatterer Analysis Reveals Ups and Downs in San Francisco Bay Area

Ferretti, F. Novali, R. Bürgmann, G. Hilley and C. Prati; EOS, Vol. 85, N. 34

Le deformazioni del suolo ricavate da dati satellitari in un settore a rischio sinkhole del Bacino delle Acque Albule (Lazio)



LINEA AV/AC
PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	77 di 79

Salvi Stefano, Pirro Mario, Gasparini Calvino, Stramondo Salvatore, Pagliuca Mario Nicola, Atzori Simone, Colini Laura, Tolomei Cristiano, Doumaz Fawzi, Ferretti Alessandro, Allievi Jacopo

Convegno Nazionale G.N.G.T.S., Rome (Italy), December 15, 2004, Pages 1-8

Space-based Tectoning Modeling in Subduction Areas Using PSInSAR

R.M.W. Musson, M. Haynes, A. Ferretti; Seismological Research Letters, Volume 75, Number 5, September/October 2004, Pages 598-606

Inflation rate of the Colli Albani volcanic complex retrieved by the permanent scatterers SAR interferometry technique

S.Salvi, S. Atzori, C. Tolomei, J. Allievi, A. Ferretti, F. Rocca, C. Prati, S. Stramondo, and N. Feuillet

Geophysical Research Letters, Vol 31, 2004, Pages 1-4

Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides

C.Colesanti, J.Wasowski

International Landslide Symposium - ISL2004 ; June 28-July 2 2004 ; Rio de Janeiro, Brazil; Pages 1-6

Conventional and PS differential SAR interferometry for monitoring vertical deformation due to water pumping: the Haussmann-St-Lazare case example (Paris, France)

Dr Bénédicte Fruneau, Dr Claudie Carnec, Dr Carlo Colesanti, Prof. Benoît Deffontaines, Dr Alessandro Ferretti, Dr Stéphane Le Mouelic, Dr Anne-Marie Le Parmentier, and Prof. Jean-Paul Rudant

FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-6

SLAM, a Service for Landslide Monitoring Based on EO-Data

Dr Paolo Manunta, Nicola Casagli, Davide Colombo, Anna Maria Defflorio, Spina Domenico, Paolo Farina, Alessandro Ferretti, Eric Gontier, Kaspar Graf, Sandro Moretti, Lateltin Olivier, Marc Paganini, Francesco Palazzo, and Tazio Strozzi

FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-6

Integration of Permanent Scatterers Analysis and High Resolution Optical Images within Landslide Risk Analysis

Mr Paolo Farina, Mr Davide Colombo, mr Alfio Fumagalli, Mr Eric Gontier, and Dr Sandro Moretti

FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-8

Analisi di fenomeni di deformazione superficiale sul territorio dell'autorità dei bacini romagnoli a partire da serie di dati radar satellitari elaborati con la tecnica dei diffusori permanenti

Jacopo Allievi; Flavio Bonsignore; Stefano Cespa; Carlo Colesanti; Davide Colombo; Alessandro Ferretti; Maurizio Morelli; Alberto Pistocchi

ASITA 2003 – 28/31 October 2003 – Verona – Italy, Pages 1-8

Slam, the development of an EO Service to support the legal obligations of Swisse and Italian Geological Risk Services in landslide risk forecasting and prevention

Marc Paganini, Francesco Palazzo, Olivier Arino, Paolo Manunta, Alessandro Ferretti, Eric Gontier, Stefan Wunderle, Paolo Pasquali, Tazio Strozzi, Johannes Zilger, Cees Van Western

IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	78 di 79

Land subsidence in the Firenze-Prato-Pistoia basin measured by means of spaceborn SAR interferometry

D. Colombo, P. Farina, S. Moretti, G. Nico, C. Prati

IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3

Estimating orbital trajectories from fringe gradients in SAR interferograms for measuring crustal strain

Andreas O. Hohlhase, Kurt L. Feigl, Didier Massonnet, Alessandro Ferretti

IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3

Monitoring slow mass movements with the Permanent Scatterers Technique

J. Allievi, C. Ambrosi, M. Ceriani, C. Colesanti, G. B. Crosta, A. Ferretti, D. Fossati

IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3

Valutazione degli effetti di scavi in falda sui cedimenti strutturali di edifici mediante utilizzo di tecniche satellitari SAR

A. Ferretti, G. Franchioni, L. Jurina

Paper presenting the results of a recent study of the causes of structural settlements observed in some monuments in the historical centre of the city of Rovigo in Italy, Pages 1-13

Monitoring Landslides and Tectonic Motions with the Permanent Scatterers Technique

Carlo Colombo, Alessandro Ferretti, Claudio Prati, Fabio Rocca

Engineering Geology, n. 68, 2003, Pages: 3-14

Ground Deformation Monitoring in the Ranafjord area of Norway by Means of the Permanent Scatterers Technique

J.F. Dehls, M. Basilico, C. Colesanti

Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2002, Toronto (Canada), 24-28 June 2002, VOL. 1, Pages 203-207, 2002

Radar Permanent Scatterers Identification in Urban Areas: Target Characterization and Sub-Pixel Analysis

A. Ferretti, C. Colesanti, C. Prati, F. Rocca

Proceedings of the Joint IEEE/ISPRS Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Roma (Italy) 8-9 November 2001, Page 52

Seismic Faults Analysis in California by Means of the Permanent Scatterers Technique

Carlo Colesanti, Alessandro Ferretti, Claudio Prati and Fabio Rocca

Keynote Paper, Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield (United Kingdom) 11-14 September 2001, ESA SP-475, January 2002, Pages 125-131

Comparing GPS, Optical Levelling and Permanent Scatterers

A. Ferretti, C. Colesanti, C. Prati, F. Rocca



LINEA AV/AC
PROGETTO PRELIMINARE - TRATTA Ronchi - Trieste

TITOLO ELABORATO

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
L344	00	R 07 RH	GN 00 00 001	A	79 di 79

Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGAARS 2001, Sydney (Australia), 9-13 July 2001, VOL. 6, Pages 2622-2624, 2001

Measuring Subsidence with SAR Interferometry: Applications of the Permanent Scatterers Technique

A.Ferretti, C. Prati, and F. Rocca

Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence, Vol. II, SISOLS2000, 2429 September 2000, Ravenna, Italy, Pages: 67 – 79

Monitoring Known Seismic Faults Using the Permanent Scatterers(PS)Technique

A.Ferretti, C. Colesanti, F. Ferrucci, C. Prati, F. Rocca

Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2000, Honolulu (USA) 24-28 July 2000, VOL. 5, Pages 2221-2223

SAR Analysis of Building Collapse by means of the Permanent Scatterers Technique

A. Ferretti, F. Ferrucci, C. Prati, and F. Rocca

Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International, Vol. 7, Pages: 3219, 3221

Modelli atmosferici per il controllo dei movimenti dell'Etna

A. Ferretti, A. Menegaz, C. Prati, F. Rocca, A. Bonforte, G. Puglisi

Alta Frequenza - Rivista di Elettronica, Vol. 11, N° 4, October - December 1999, Pages 1 – 6

Per la bibliografia completa consultare il sito web www.treuropa.com alla sezione *PSInSAR™ Technique / Publications*



TRE
Sensing the Planet

Analisi di dati radar satellitari
mediante la tecnologia
PSInSAR™
Manuale d'uso



Contatti

Tele-Rilevamento Europa - T.R.E. s.r.l

Uffici operativi

Via Vittoria Colonna, 7

20149 Milano - Italia

Tel.: +39.02.4343.121

Fax: +39.02.4343.1230

www.treuropa.com

www.psinsar.com

e-mail: tre@treuropa.com

Sede legale

c/o Politecnico di Milano - Dipartimento di Elettronica e Informazione

P.za Leonardo da Vinci, 32

20133 Milano – Italia

TRE Canada Inc.

Headquarters

#550 – 409 Granville Street

Vancouver, BC, V6C 1T2 - Canada

www.trecanada.com

Tel: +1.604.331.2512

Fax: +1.604.331.2513

www.trecanada.com

e-mail: info@trecanada.com

Indice

Introduzione	5
1 Generalità sui sistemi Radar ad Apertura Sintetica (SAR)	7
1.1 Sistemi di telerilevamento radar satellitari	7
1.2 Modalità di acquisizione dei sensori SAR	8
1.3 Geometrie di acquisizione	9
1.4 I satelliti ERS e ENVISAT dell'Agencia Spaziale Europea (ESA)	10
1.5 Il satellite RADARSAT-1	11
1.6 Le immagini radar	11
1.7 Deformazioni prospettiche	12
1.8 Interferometria radar differenziale DInSAR	15
2 Permanent Scatterers	20
2.1 Galleria di esempi	23
3 Comprendere i Permanent Scatterers	30
3.1 Che cosa sono i <i>Permanent Scatterers</i> ?	30
3.1.1 Quali fattori determinano la presenza dei PS sul territorio?	31
3.1.2 Riflettori artificiali	33
3.1.3 Esperimento con riflettori artificiali	33
3.1.4 Esempi di applicazione	35
3.1.5 Strategia di monitoraggio con riflettori artificiali	39
3.2 Che cosa misurano i PS?	39
3.2.1 Misure lungo la congiungente sensore-bersaglio	42
3.2.2 Combinazione dei dati PS ascendenti e discendenti	47
3.2.3 Proiezione delle velocità dei PS nella direzione di massima pendenza	50
3.3 Misure relative	51
3.3.1 Punto di riferimento REF	51
3.3.2 Processo di georeferenziazione	52
3.4 Analisi Multidataset su aree estese	53
4 Precisione ed Accuratezza	56
4.1 Definizioni importanti	56
4.2 Sorgenti di errore	56
4.3 Precisione delle misure	57
4.3.1 Errore di georeferenziazione	57
4.3.2 Errore sulle velocità medie e sulle serie storiche	59
4.4 Ambiguità della misura	59
5 Vantaggi e limiti della tecnica PSInSAR™	62
6 Sinergia con le tecniche di monitoraggio convenzionali	64
6.1 Validazione del dato PS con misure di livellazione ottica e GPS	66
6.1.1 PS vs livellazione ottica	66
6.1.2 PS vs GPS	67
7 Formato dei dati	68
7.1 Struttura del database	68
7.2 I parametri di qualità: Coerenza e Deviazione Standard	70



8	Guida pratica	74
8.1	Visualizzare i PS nei sistemi informativi territoriali	74
8.2	Utilizzo della Client Toolbar.....	80
8.3	Visualizzazione delle velocità e impostazione della scala cromatica	82
8.4	Consultazione delle serie storiche	84
9	Applicazioni	88
9.1	Subsidenza	88
9.1.1	Estrazione di fluidi dal sottosuolo.....	89
9.1.2	Attività mineraria	91
9.1.3	Sinkholes.....	92
9.2	Instabilità di versante	93
9.3	Faglie sismiche e vulcani	104
9.3.1	Aree tettonicamente attive	104
9.3.2	Aree vulcaniche.....	106
9.4	Infrastrutture, singoli edifici, beni architettonici.....	107
	Appendice I: Bibliografia e riferimenti alla tecnica PSInSAR™	109



Introduzione

Questo manuale nasce con il duplice obiettivo di fornire gli approfondimenti teorici di supporto circa le tematiche inerenti la Tecnica dei Permanent Scatterers (PSInSAR™) e di illustrare in maniera operativa come utilizzare i dati PS ottenuti dalle elaborazioni.

La Tecnica PS è un brevetto del Politecnico di Milano ed è stata sviluppata grazie a ricerche ventennali svolte dal Gruppo SAR del Dipartimento di Elettronica ed Informazione e da Tele-Rilevamento Europa, primo spin-off dell'ateneo milanese. Il brevetto è stato concesso in licenza d'uso esclusiva a TRE nel 2000.

Si tratta di uno strumento molto efficace per il monitoraggio, ad alta precisione, dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre, basato sull'impiego di serie temporali d'immagini radar satellitari. I sistemi radar coerenti e, nello specifico, i radar di tipo SAR (Synthetic Aperture Radar) utilizzati nella Tecnica PS, sono in grado di misurare la distanza tra il sensore e un bersaglio a terra, registrando il tempo intercorso tra l'emissione dell'onda elettromagnetica e la ricezione del segnale retro-diffuso dal bersaglio stesso. Grazie alla loro periodicità di acquisizione (circa mensile), i dati SAR forniscono misure ripetute della distanza sensore-bersaglio lungo la direzione di vista del satellite. Il confronto della distanza, misurata in istanti di tempo diversi, consente di mettere in luce eventuali spostamenti.

La Tecnica PS sfrutta tutte le acquisizioni disponibili su una stessa area di interesse e individua quei bersagli (*Permanent Scatterers*) che mantengono inalterate nel tempo le proprie caratteristiche elettromagnetiche. Per ciascuno di essi è possibile ricostruire la serie storica di spostamento, nell'intervallo di tempo analizzato e con precisione millimetrica.

I PS corrispondono tipicamente a edifici, rocce esposte e altri rilevati. L'opportunità di poter disporre di molti PS consente di apprezzare le caratteristiche multi-scala della tecnologia: è possibile effettuare misure puntuali e valutare, contemporaneamente, il contesto aereo nel quale si inquadrano tali misure. Un ulteriore vantaggio è dato dalla disponibilità di dati storici a partire dal 1992, che permettono analisi di movimenti progressi, diversamente non rilevabili su aree non preventivamente strumentate.

La densità dei punti di misura dipende dalla tipologia di area d'interesse e di terreno: il tessuto urbano presenta densità solitamente elevate di punti di misura (>100 PS/kmq), al contrario delle zone fortemente vegetate, dove solitamente non risulta possibile fornire alcuna informazione utile.

Per consentire al lettore di acquisire una conoscenza graduale della tecnica PSInSAR™, senza tralasciare spunti per l'approfondimento, il presente manuale è organizzato nelle seguenti sezioni:

- La *sezione 1* riporta alcuni concetti generali sul principio di funzionamento dei sistemi SAR satellitari e sull'interferometria SAR.
- La *sezione 2* fornisce una descrizione sintetica sui *Permanent Scatterers* e sulle informazioni che è possibile estrarre dalla loro analisi, allegando una sequenza di immagini esemplificative delle situazioni in cui sono maggiormente utilizzati.



- La *sezione 3* rappresenta il fulcro del manuale: in essa vengono riportati i “concetti cardine” per la corretta comprensione ed interpretazione dei dati PS, quali la modalità di acquisizione e la relatività spazio-temporale delle misure.
- La *sezione 4* affronta l'argomento della precisione e dell'accuratezza dei dati PS.
- La *sezione 5* riporta in sintesi i vantaggi ed i limiti della tecnica PS
- La *sezione 6* offre un confronto tra la tecnica PS e le comuni tecniche di monitoraggio ambientale (essenzialmente, GPS e livellazione ottica), evidenziando come un impiego combinato di queste tecniche possa garantire numerosi vantaggi nel settore della gestione e della pianificazione del territorio;
- La *sezione 7* descrive le caratteristiche principali del prodotto fornito all'utente, illustrando la struttura di ciascun file digitale consegnato al cliente.
- La *sezione 8* indica all'utente come visualizzare e gestire in ambiente GIS i dati PS illustrati nella sezione precedente.
- La *sezione 9* fornisce un quadro dettagliato delle diverse applicazioni in cui possono essere utilizzati i *Permanent Scatterers*, illustrando i risultati di alcuni casi reali.

1 Generalità sui sistemi Radar ad Apertura Sintetica (SAR)

1.1 Sistemi di telerilevamento radar satellitari

I sistemi radar satellitari forniscono immagini elettromagnetiche (a frequenze comprese tra 500MHz e 10GHZ) della superficie terrestre con risoluzione spaziale di qualche metro. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa e sia di giorno sia di notte.

Il principio di funzionamento *radar* (acronimo di *radio detecting and ranging*) è il seguente: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incidendo sulla superficie terrestre subisce un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. Il dispositivo è in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico (*detecting*) e, misurando il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione, valutare la distanza (*ranging*) a cui è posizionato, localizzandolo in modo preciso lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di *range*).

La direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione (detta di *azimuth*). Quanto più grande è l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta e, di conseguenza, tanto meglio viene localizzato il bersaglio. Chiaramente ciò avviene a scapito dell'estensione dell'area illuminata. Per ovviare questo inconveniente, le antenne molto direttive usate per i radar militari e per applicazioni di aviazione civile ruotano, in modo da "spazzare" tutta l'area circostante alla loro posizione.

L'idea alla base del SAR (Synthetic Aperture Radar - Radar ad Apertura Sintetica) consente di risolvere il compromesso risoluzione–estensione dell'area osservata. Combinando coerentemente (cioè tenendo conto di ampiezza e fase del segnale SAR, concetti il cui significato fisico si introdurrà in seguito) i dati acquisiti dal sensore in posizioni successive, si sintetizza un'antenna fittizia di grandi dimensioni detta, appunto, ad apertura sintetica. È proprio questo procedimento a garantire un'elevata risoluzione anche nella direzione di azimuth.

Poiché il sistema illumina lo spazio circostante con radiazioni elettromagnetiche proprie è detto sistema *attivo*: non è richiesta infatti illuminazione solare e le frequenze utilizzate dal radar penetrano attraverso le nuvole, evitando così i già accennati problemi di acquisizione dei sistemi ottici.

In Figura 1 è illustrato il confronto tra un'acquisizione di tipo ottico e una radar, ottenuta dai satelliti ERS dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), della stessa area. Le informazioni geografiche di carattere generale sono le stesse, tuttavia nell'immagine radar si può notare come le strutture al suolo rispondano in modo differente alle onde elettromagnetiche emesse: le strade appaiono nere poiché riflettono specularmente il campo trasmesso, mentre strutture metalliche sono particolarmente luminose (al centro dell'immagine).

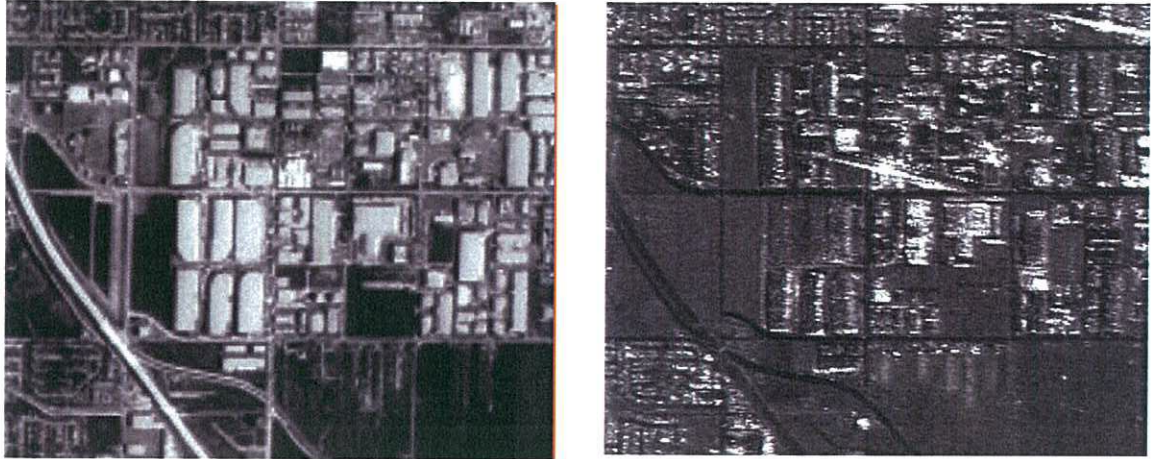


Figura 1: Confronto tra acquisizione ottica (a sinistra) e acquisizione radar di tipo SAR (a destra).

1.2 Modalità di acquisizione dei sensori SAR

I satelliti SAR percorrono orbite eliosincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani, illuminando, da una quota attorno a 800 km, una striscia di terreno (*swath*) larga circa 100 km con un sistema radar SAR operante nel dominio delle microonde a varie bande (C, X, L), ovvero con lunghezze d'onda λ pari a 3-20 cm, caratteristica fondamentale per poter apprezzare movimenti millimetrici.

La stessa orbita nominale viene ripercorsa dopo un intervallo definito (*revisiting time*), consentendo così di acquisire dati relativi alla stessa scena al suolo in tempi differenti.

La direzione parallela all'orbita è detta *azimuth* e coincide approssimativamente con la direzione Nord-Sud. La risoluzione (ovvero la capacità di riconoscere come distinti due bersagli) in azimuth vale solitamente qualche metro.

La direzione della congiungente sensore-bersaglio (perpendicolare all'orbita ed inclinata di un angolo θ - detto *off-nadir* - rispetto alla verticale) è detta *slant range* (o più semplicemente *range*) oppure *Line Of Sight* (LOS).

Le immagini radar si sviluppano pertanto lungo le direzioni di *range* e *azimuth*, dette usualmente coordinate SAR. In Figura 2 è rappresentata schematicamente la geometria di acquisizione dei sistemi SAR-ERS.

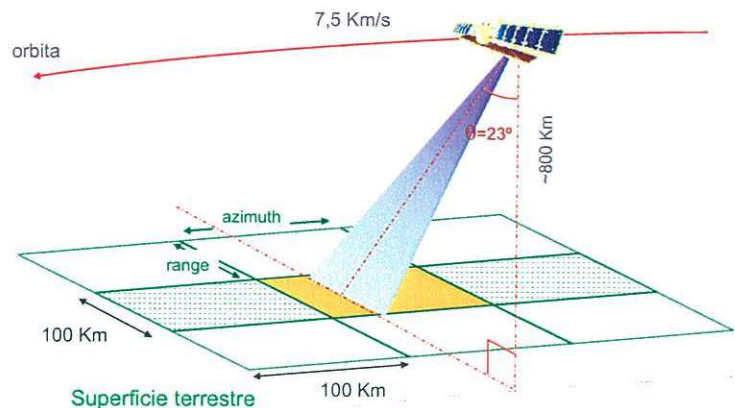


Figura 2: Geometria d'acquisizione SAR delle piattaforme ERS-1 ed ERS-2.

1.3 Geometrie di acquisizione

Dalla combinazione della rotazione terrestre con le orbite eliosincrone risulta che una stessa area della superficie terrestre viene illuminata dalla radiazione radar sia durante un passaggio del satellite in direzione Nord-Sud, denominata geometria discendente, sia durante un passaggio del satellite in direzione Sud-Nord, denominata geometria ascendente.

Ciò significa che l'area al suolo viene rilevata sotto due angoli di vista praticamente speculari.

Entrambe le geometrie hanno lo stesso *revisiting time*.

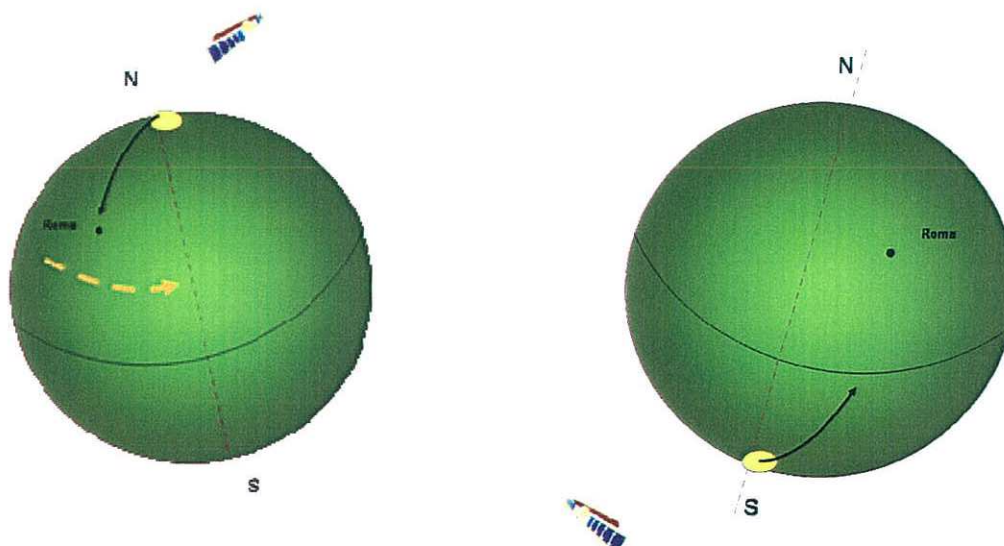


Figura 3: Geometrie di acquisizione discendente (a sinistra) e ascendente (a destra).

1.4 I satelliti ERS e ENVISAT dell'Agencia Spaziale Europea (ESA)

Nel maggio 1991 l'Agencia Spaziale Europea (ESA) lanciò il primo SAR europeo a bordo del satellite **ERS-1**, seguito nel 1995 dal gemello **ERS-2** (Figura 4) posto sulla sua stessa orbita ma con un ritardo di un giorno.

I principali dati nominali dei sensori ERS sono:

- revisiting time: 35 giorni;
- risoluzione in azimuth: 5 m;
- risoluzione in *range*: 8 m;
- angolo θ , *off-nadir*: 23°.

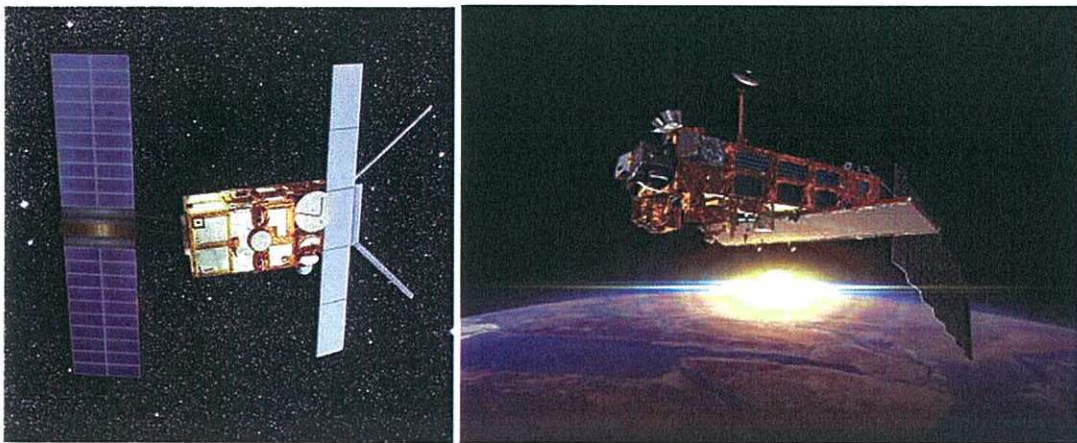


Figura 4: Immagini dei satelliti ERS-2 ed ENVISAT (©ESA)

Grazie alla scelta di ESA di acquisire continuamente i dati a partire dal 1992, per vaste aree del pianeta, sono oggi disponibili i dataset dell'ultimo decennio composti da un'immagine radar ogni 35 giorni. Questi costituiscono un'informazione storica di enorme rilevanza poiché è possibile studiare l'evoluzione della fase di pixel omologhi in ciascuna acquisizione e ricostruire quindi la storia delle deformazioni del terreno.

Il 1 Marzo 2002 è stato lanciato il satellite ENVISAT, disposto sulla stessa orbita dei satelliti ERS. Oltre a varie strumentazioni, dispone a bordo anche di un sensore SAR (*Synthetic Aperture Radar*) con caratteristiche molto simili a quelle dei sensori ERS. Purtroppo, una politica di acquisizione non costante, non consente ad oggi di disporre di grandi archivi di dati utilizzabili per servizi di monitoraggio.

1.5 Il satellite RADARSAT-1

RADARSAT-1 è la missione SAR satellitare della Agenzia Spaziale Canadese. Lo strumento a bordo è un radar ad apertura sintetica con caratteristiche nominali lievemente differenti da quelle delle missioni ERS ed ENVISAT. Le modalità di acquisizione sono molteplici mentre le orbite garantiscono, come nel caso dei satelliti europei, la copertura dell'intero pianeta sia secondo geometrie discendenti sia ascendenti.

La strategia di acquisizione adottata da RADARSAT è "on demand", quindi, nonostante la missione sia operativa dal 1996, non sono stati creati gli archivi storici che contraddistinguono i dati ERS. TRE ha deciso di investire nella pianificazione stipulando un accordo con il fornitore di dati canadese e il distributore italiano di dati. A partire da Marzo 2003 sono iniziate le acquisizioni sistematiche su tutto il territorio nazionale nella doppia modalità, ascendente e discendente. Si è quindi iniziata la costruzione di un archivio storico affidabile ed aggiornabile con continuità di anno in anno.

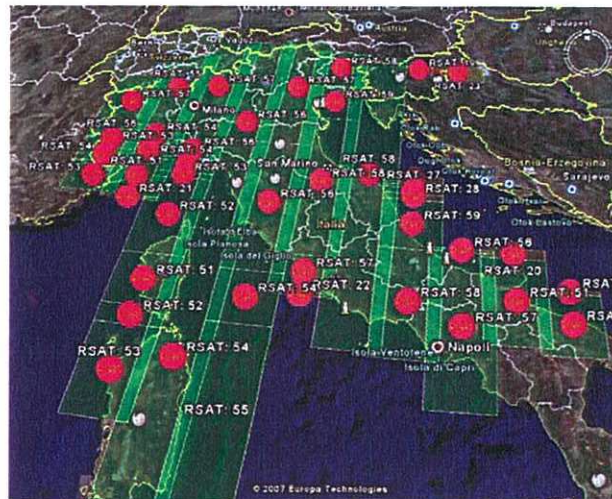


Figura 5: Archivio Italiano immagini RADARSAT disponibili da Maggio 2003 ad oggi.

1.6 Le immagini radar

Le immagini radar sono matrici di numeri complessi definiti dalle grandezze di ampiezza e fase.

L'ampiezza individua la quantità di campo elettromagnetico retrodiffusa verso il satellite, mentre la fase dipende da diversi fattori, tra cui la distanza sensore-bersaglio. Proprio la fase costituisce l'informazione chiave per le applicazioni interferometriche volte all'identificazione di aree soggette a fenomeni di movimento superficiale.



In fase di acquisizione ogni bersaglio a terra è colpito da più impulsi elettromagnetici emessi dal sensore lungo la sua orbita. Le agenzie spaziali forniscono, su un opportuno supporto (CD o DVD), l'eco degli impulsi radar così come sono stati ricevuti dal satellite. Si parla, in questo caso, di dati grezzi (raw data).

Le immagini radar propriamente dette nascono solo a valle di un algoritmo di focalizzazione, che permette di associare alle varie celle di risoluzione (pixel) il relativo contributo di energia retrodiffusa: ad ogni elemento della matrice corrisponde una zona a terra di 20 per 5 metri circa (su terreno piano). Ogni supporto contiene una quantità di dati relativa ad un'area di 100 x 100 Km (10000 km²).

Durante i vari passaggi lungo la stessa orbita i satelliti si discostano leggermente dalla traiettoria nominale, di fatto vi sono delle variazioni dell'ordine delle centinaia di metri descritte dal parametro baseline geometrico (o normale); di conseguenza la geometria di acquisizione per la stessa zona varia di volta in volta di angoli θ leggermente diversi creando matrici di pixel non corrispondenti alla medesima cella di risoluzione al suolo.

Per effettuare l'analisi è necessario che a pixel omologhi nelle varie immagini corrisponda la stessa cella di risoluzione, si procede quindi con una fase di elaborazione dei dati detta registrazione (o ricampionamento). Operativamente, tra tutte le acquisizioni, si sceglie un'immagine, detta master, come riferimento; tutte le rimanenti, dette slave, vengono ricampionate sulla geometria della master, grazie ad un opportuno modello, in modo da avere la stessa griglia di riferimento per tutti i passaggi del satellite. Il modello utilizzato permette di compensare sia una rotazione sia una traslazione indotta sulle immagini a causa del differente angolo di vista.

La scelta dell'immagine master è dettata principalmente dall'esigenza di minimizzare i cosiddetti fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica, come illustrato nella sezione 1.80. Per tale ragione, in fase iniziale la serie storica di ciascun PS ha valore nullo di spostamento in corrispondenza della data di acquisizione dell'immagine master. Nell'analisi PSInSAR™ prima della consegna dei risultati al committente, allo scopo di facilitare la lettura dei diagrammi delle serie storiche di spostamento dei PS, il tempo t_0 viene fatto coincidere con la data della prima immagine disponibile (cfr.7.1).

1.7 Deformazioni prospettiche

La modalità di acquisizione, non perpendicolare al suolo ma secondo un angolo di vista θ , descritta precedentemente, dà origine nelle immagini focalizzate a delle deformazioni prospettiche dovute alla topografia del terreno. In base alla pendenza del terreno si distinguono tre differenti tipi:

1. *foreshortening*: si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore-bersaglio (pendenza positiva pari



- all'angolo di off-nadir θ); in questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo pixel molto luminosi nell'immagine di ampiezza.
2. *layover*: si verifica quando la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo θ ; questo produce una forte distorsione dell'immagine che impedisce la corretta interpretazione del segnale e ogni analisi quantitativa.
 3. *shadowing*: si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso radar perché schermate da altri oggetti; si producono quindi nell'immagine di ampiezza aree molto scure (in ombra).

In Figura 6 sono riportate le geometrie dei diversi fenomeni.

In Figura 7 è rappresentata la mappa di riflettività multi-immagine (composta da più immagini focalizzate) di un'area montuosa, in cui si evidenzia molto bene la presenza di fenomeni di *foreshortening* (linee bianche) per i versanti orientati verso il satellite.

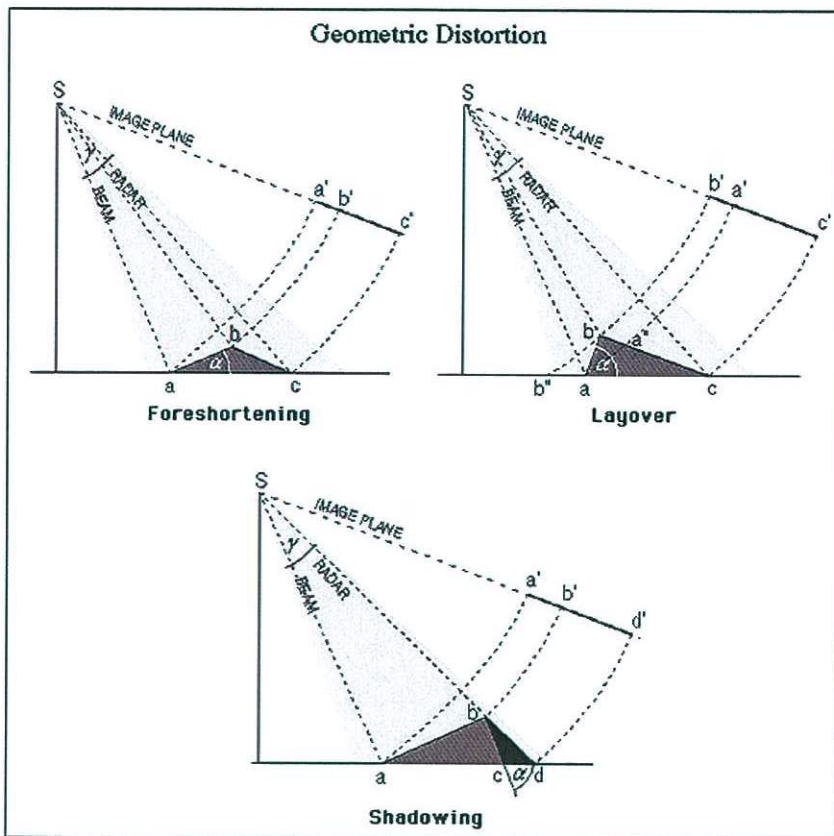


Figura 6: Deformazioni prospettiche: foreshortening, layover, shadowing



Figura 7: Fenomeni di deformazione prospettica in immagini focalizzate SAR. Al centro della figura, versanti in foreshortening (linee bianche).



1.8 Interferometria radar differenziale DInSAR

La tecnica tradizionale per lo studio di dati SAR è l'interferometria differenziale (DInSAR), che si basa sull'analisi dell'evoluzione del valore di fase tra due distinte acquisizioni in modo tale da mettere in luce eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione, topografia o disturbi atmosferici.

L'interferogramma è la matrice di dati ottenuta dal confronto tra le due distinte acquisizioni della stessa area e racchiude in sé le informazioni relative ai vari contributi che generano il valore di fase.

Come accennato, il segnale radar relativo ad un bersaglio è caratterizzato da due valori: l'ampiezza e la fase.

L'ampiezza individua la parte di campo elettromagnetico incidente riflessa verso il sensore. Nelle immagini radar di ampiezza appaiono particolarmente luminose le strutture metalliche (tralicci, antenne, linee ferroviarie), mentre bacini d'acqua e strade sono solitamente poco luminosi: essi sono caratterizzati infatti da fenomeni di riflessione speculare in cui la porzione di campo riflessa verso il satellite risulta molto contenuta.

La fase racchiude l'informazione più importante ai fini delle applicazioni interferometriche: la distanza sensore-bersaglio. I termini che contribuiscono alla fase di una singola immagine SAR sono molteplici e possono essere riassunti nella seguente equazione:

$$\phi = \psi + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r + \alpha + n$$

dove ψ è il termine di fase dovuto alla riflettività del bersaglio (dipendente dal materiale e dalla sua geometria), α è un contributo di fase dovuto all'atmosfera, r è la distanza sensore-bersaglio (questo valore, moltiplicato per il fattore riportato nell'equazione, viene indicato con il termine di *propagatore*) e n è un inevitabile rumore proprio del sistema di acquisizione.

L'obiettivo della tecnica interferometrica è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili a disturbi, ovvero stimare accuratamente la differenza di cammino ottico Δr dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal bersaglio a terra.

La fase di una singola immagine SAR non è di fatto utilizzabile, perché risulta impossibile discriminare un contributo dall'altro. Se si hanno, però, due acquisizioni relative alla stessa area, accuratamente registrate sulla stessa griglia di riferimento, è possibile utilizzare l'informazione contenuta in esse. In questo caso, infatti, si genera un interferogramma sottraendo la fase di un'immagine a quella dell'altra.

L'interferogramma è una matrice di dati ottenuta dal confronto tra due distinte acquisizioni relative alla stessa area e racchiude in sé le informazioni relative ai vari contributi che generano il valore di fase. Si tratta di un'immagine in cui a ciascun pixel è associato un

valore di fase dato dalla differenza tra i contenuti di fase (Φ_i , Φ_j) delle due acquisizioni utilizzate (i, j):

$$\phi_i - \phi_j = \Delta\psi + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r + \Delta\alpha + noise.$$

Tipicamente, un interferogramma presenta una serie di frange colorate, in cui i diversi colori rappresentano diversi valori di fase (Figura 8). Ciascuna frangia rappresenta un ciclo di variazione della fase interferometrica.

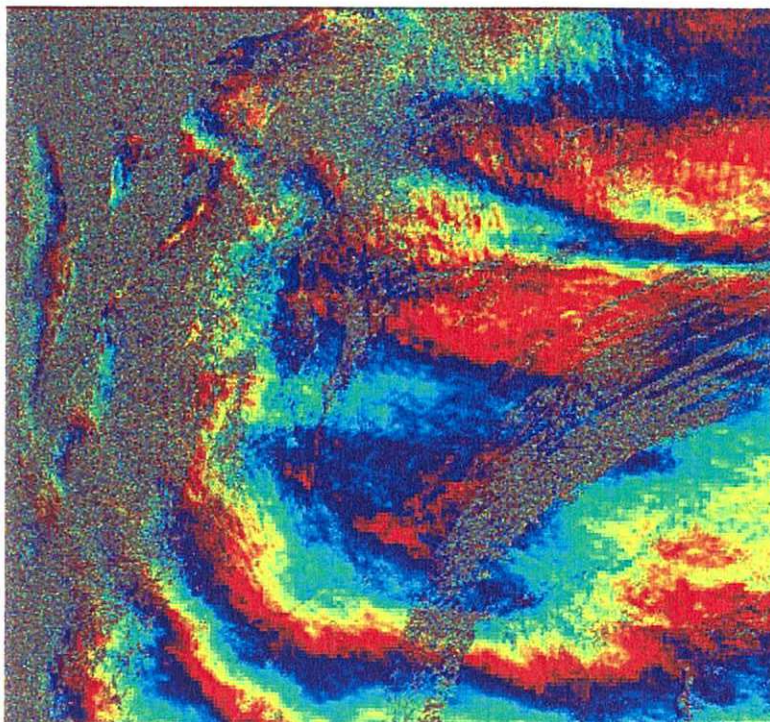


Figura 8: Esempio di interferogramma

Se non avvengono particolari cambiamenti nel periodo tra le due acquisizioni, i contributi dovuti alla riflettività si elidono e la fase dell'interferogramma dipende, con buona approssimazione, solo dalla distanza sensore-bersaglio e quindi da eventuali movimenti intercorsi tra le due acquisizioni (a parte i contributi spuri dovuti all'atmosfera e al rumore). In condizioni ideali dunque l'interferogramma può essere assimilato ad una mappa degli spostamenti.

In realtà diversi effetti riducono (o addirittura compromettono) la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR.

In primo luogo i fenomeni di decorrelazione temporale che sono causati dalla variazione delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli radar nel tempo: in questo caso l'ipotesi che il contributo Ψ si elida generando l'interferogramma non è più verificata. Questi fenomeni risultano più marcati al crescere dell'intervallo di tempo tra le due acquisizioni utilizzate, definito *baseline temporale*. Le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono fonte di decorrelazione, mentre i centri urbani e le rocce esposte rimangono maggiormente stabili nel tempo.

La qualità dell'interferogramma dipende anche dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini (detta *baseline normale* o *geometrica*). Si può dimostrare che maggiore è il valore assoluto del *baseline*, minore è la banda comune tra i due segnali e quindi minore è il rapporto segnale-rumore relativo all'interferogramma da esse generato. Questo disturbo è denominato: decorrelazione geometrica.

La qualità totale di un interferogramma si misura attraverso un parametro denominato coerenza di fase, esso indica quanto un interferogramma è affetto dai vari tipi di decorrelazione appena descritti.

In Figura 10 è mostrato un esempio riassuntivo.

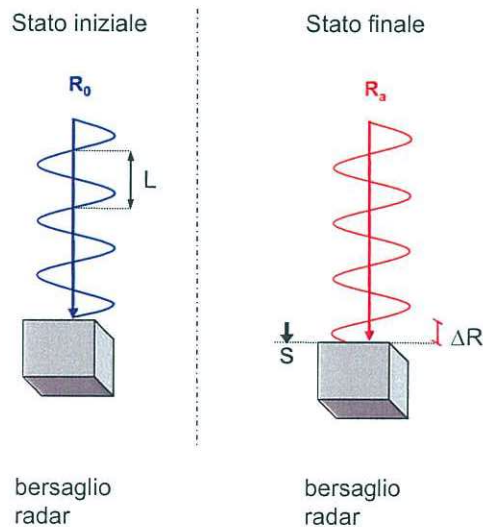


Figura 9: Rappresentazione schematica del principio interferometrico.

L'interferogramma a) è stato ottenuto utilizzando due acquisizioni a distanza di 1 giorno e con differenza nell'orbita nominale, pari a 123 m. Visto il limitato intervallo di tempo le condizioni della scena non mutano sensibilmente, infatti l'interferogramma presenta una buona coerenza di fase, ovvero sono pressoché assenti nell'immagine fenomeni di rumore. Le frange ben visibili corrispondono a variazioni di fase, e quindi alla variazione della

distanza sensore-bersaglio, pari ad un ciclo ($\lambda/2$). Di fatto, in questo caso, le frange sono costituite solamente dalla componente topografica della zona campione.

Si può osservare nell'interferogramma b) come, aumentando l'intervallo temporale, pari ora a 1984 giorni, ma mantenendo quasi inalterata la componente di *baseline normale* (149 m), subentrino sensibili disturbi dovuti a decorrelazione temporale e viene a mancare la coerenza di fase presente nel caso a).

Nell'interferogramma c) i valori di *baseline temporale* e *normale* sono entrambi elevati: l'immagine appare del tutto rumorosa e si perde completamente coerenza di fase.

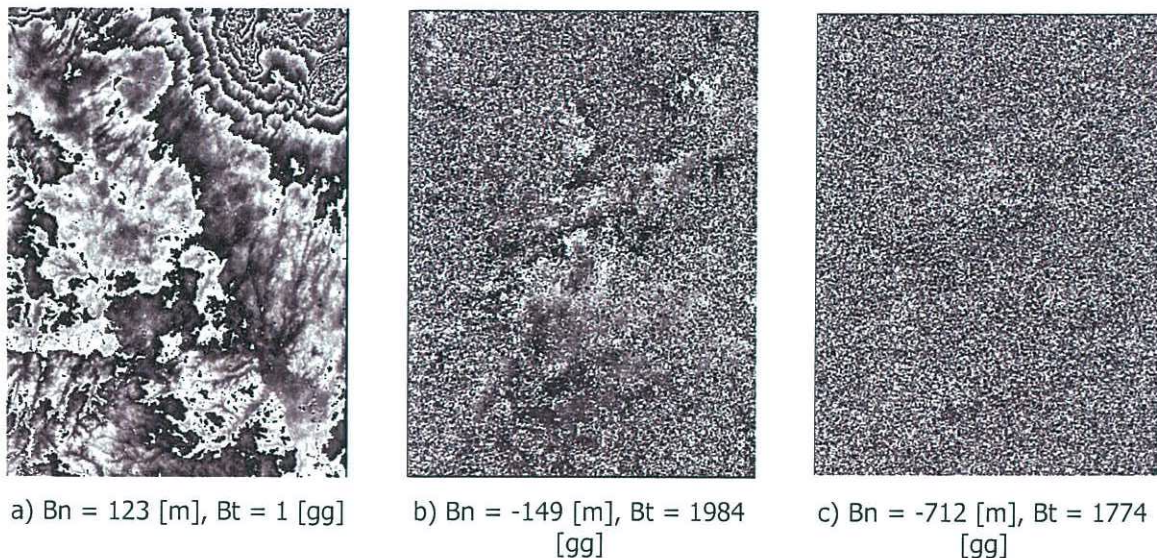


Figura 10: Interferogrammi e disturbi dovuti a decorrelazione temporale e geometrica.

La variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni si può tradurre in un ulteriore termine di fase (α), difficilmente discriminabile da eventuali fenomeni di movimento (Figura 11). In pratica l'attraversamento della troposfera¹ determina un ritardo nella propagazione del segnale, i cui effetti possono essere erroneamente interpretati come spostamenti superficiali del terreno. I valori dei parametri fisici (umidità, temperatura e pressione) della troposfera variano lentamente nello spazio (ad esempio, in un raggio di qualche km), mentre possono essere totalmente diversi da un giorno ad un altro; per questa ragione si è soliti dire che il disturbo atmosferico è correlato nello spazio ma non nel tempo.

¹ La troposfera è la fascia dell'atmosfera a diretto contatto con la superficie terrestre, il cui spessore varia in funzione della latitudine (dai 6-7 km ai poli fino ai 17 km all'equatore). In essa sono concentrati i $\frac{3}{4}$ dell'intera massa gassosa e quasi tutto il vapore acqueo dell'atmosfera. È lo strato dove avvengono la maggior parte dei fenomeni meteorologici, causati dalla circolazione delle masse d'aria e che danno vita ai venti, alle nuvole ed alle precipitazioni.



Figura 11: Componente atmosferica di fase sovrapposta all'immagine di ampiezza.

Riassumendo:

- con l'interferometria DInSAR si possono stimare movimenti dell'ordine del centimetro; inoltre, in genere non è possibile effettuare stime puntuali, ma solo analisi areali (estensione $> 0.2 \text{ km}^2$).
- i limiti dell'interferometria DInSAR sono legati ai fenomeni di decorrelazione e al disturbo atmosferico; queste difficoltà sono in gran parte risolte dalla tecnica dei diffusori permanenti o *Permanent Scatterers* (PSInSAR™).

La tecnica PSInSAR™ è basata sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito dai PS, è praticamente immune agli effetti di decorrelazione geometrica (i PS sono bersagli molto più piccoli della cella di risoluzione) e temporale (sono stabili nel tempo). Tali bersagli preservano coerenza di fase e possono essere utilizzati per ricostruire e compensare efficacemente il disturbo atmosferico sull'intera immagine radar, sfruttando il fatto che le condizioni atmosferiche variano lentamente nello spazio, e non sono correlate nel tempo. Affinché ciò sia possibile è necessario disporre di data set di almeno 25-30 immagini, e che la densità spaziale di PS sia sufficientemente elevata (maggiore di 5 PS/km^2).



2 Permanent Scatterers

I diffusori permanenti (*Permanent Scatterers, PS*) sono bersagli radar identificati sulla superficie terrestre dal satellite, in corrispondenza dei quali è possibile eseguire misure di spostamento con precisione millimetrica. Questi punti vengono individuati mediante un complesso algoritmo di elaborazione numerica dei segnali, ideato dal gruppo SAR del Politecnico di Milano alla fine degli anni '90 e perfezionato da TRE.

I PS corrispondono ad elementi già presenti al suolo, quali manufatti (edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici, etc.) oppure elementi naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito, etc.), che si distinguono nell'area esaminata, per il fatto di possedere una elevata stabilità nel tempo della risposta elettromagnetica ("firma radar").

L'idea di base è illustrata in Figura 12. Il sensore radar montato sul satellite invia un impulso elettromagnetico verso la superficie terrestre; gli elementi a terra riflettono il segnale, rinviandone verso il satellite una porzione (retrodifusione o *backscattering*). Misurando il tempo trascorso tra l'invio del segnale e la ricezione del segnale retrodiffuso (informazione associata alla fase dell'onda elettromagnetica), il sistema radar è in grado di determinare la distanza intercorrente tra il sensore ed il bersaglio. Dunque, se l'oggetto si trova in un'area affetta da fenomeni di deformazione superficiale, il sensore rileva tra una acquisizione e l'altra una variazione di distanza e quindi lo spostamento del bersaglio. Questo è possibile grazie al fatto che l'algoritmo PSInSAR™ consente di depurare il segnale dai disturbi di decorrelazione e atmosferici come illustrato nel paragrafo precedente (cfr.1.8).

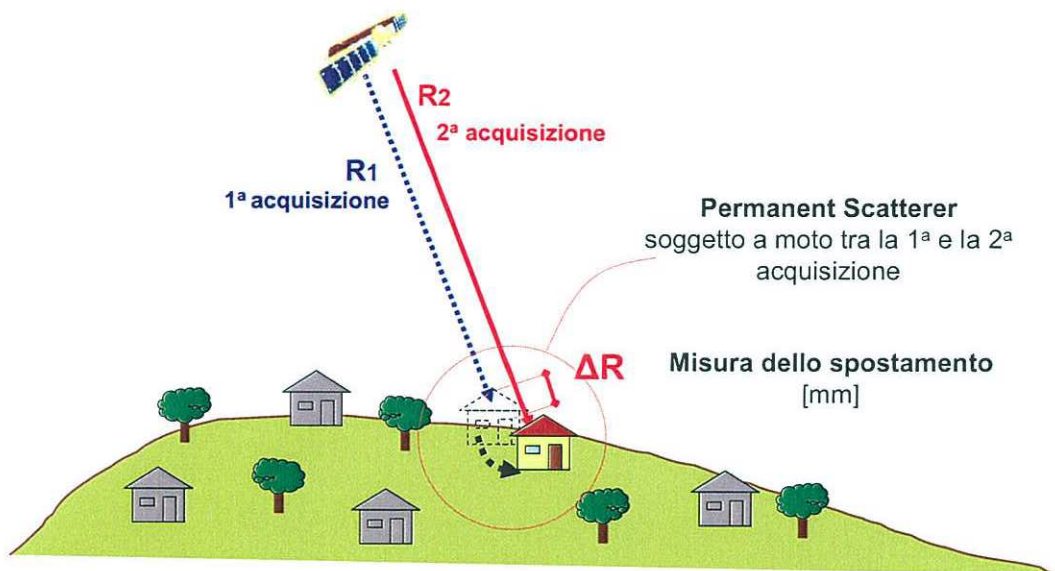


Figura 12: principio di funzionamento della tecnica PSInSAR™ basato sulla misura di variazione di distanze.

I PS offrono una copertura territoriale ampia, anche migliaia di km². La densità spaziale dei PS risulta variabile a seconda del sensore utilizzato per l'analisi, dell'uso del suolo e della morfologia del terreno (sezione 3.1.1). In generale, i PS raggiungono una densità molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e delle aree antropizzate, mentre sono assenti nelle zone vegetate o innevate.

Tutte le misure di spostamento, associate a ciascun PS, sono rilevate lungo la linea di vista del sensore (ossia, la congiungente sensore-bersaglio o *Line Of Sight, LOS*; sezione 3.2.1) e sono di tipo differenziale, ovvero riferite spazialmente ad un punto a terra di coordinate note, detto *reference point*, e temporalmente alla data di acquisizione della prima immagine; le informazioni di movimento fornite dai PS sono pertanto relative e non assolute. Inoltre, i dati vengono acquisiti con cadenza variabile da sensore a sensore (*revisiting time*); in riferimento ai satelliti attualmente operanti, si ricorda che ERS ed ENVISAT hanno un tempo di rivisitazione uguale a 35 giorni, RADARSAT pari a 24 giorni.

Sul territorio l'insieme dei PS può essere visto come una rete naturale di "capisaldi radar", concettualmente analoga ad una rete di stazioni GPS (*Global Positioning System*), utile sia per conoscere lo spostamento di un singolo bersaglio a terra (ad esempio, un edificio), sia per ricostruire, a livello regionale, la distribuzione territoriale e l'evoluzione dei fenomeni deformativi superficiali legati a subsidenza, instabilità di versante, faglie, attività vulcanica, ecc. La differenza sostanziale è che la densità dei PS è di gran lunga superiore a quella dei capisaldi di una rete geodetica tradizionale e che i PS non necessitano di alcuna monumentazione. Inoltre, la tecnica PS consente di campionare aree molto ampie in tempi



relativamente ristretti, condizione assolutamente irrealizzabile con le altre tecniche di monitoraggio.

Un ulteriore vantaggio della tecnologia satellitare rispetto alle comuni tecniche di rilevamento degli spostamenti superficiali è costituito dalla possibilità di disporre di una cospicua serie di immagini radar già acquisite sull'intero territorio nazionale. Infatti, grazie agli archivi dell'ESA (*European Space Agency*) e della CSA (*Canadian Space Agency*), è possibile ricostruire la dinamica dell'area di interesse a partire dal 1992. Questo può rivelarsi un elemento decisivo per l'indagine, soprattutto laddove le tecniche convenzionali richiederebbero anni prima di poter dare misure significative.

I PS rappresentano quindi uno strumento operativo ideale per studiare e monitorare, con una frequenza mensile di aggiornamento del dato ed una precisione millimetrica, i fenomeni deformativi della superficie terrestre su una griglia ad elevata densità spaziale di bersagli radar. Inoltre, grazie all'automatismo dell'elaborazione che li produce e all'ottimizzazione dei tempi di calcolo, i risultati ottenuti con l'analisi PSInSAR™ permettono di ottenere un quadro sinottico dei fenomeni in atto a costi decisamente competitivi rispetto alle analisi convenzionali, dato che il sensore rileva punti di misura che si trovano già sul terreno e che non richiedono alcun intervento di installazione e manutenzione.

È infine opportuno precisare che, per le particolari caratteristiche della tecnologia utilizzata (cfr.4.4), la tecnica consente di apprezzare con grande precisione movimenti deformativi lenti, con velocità di spostamento (lungo la linea di vista del sensore) tipicamente inferiori a circa 20 cm/a, mentre può non risultare adatta al monitoraggio di fenomeni più veloci.

Le applicazioni condotte su aree di grande estensione, finalizzate alla perimetrazione di fenomeni franosi a livello regionale, hanno mostrato un'ottima complementarità tra i risultati dell'analisi PS e quelli ottenuti con il tradizionale approccio geologico-geomorfologico. Grazie alla disponibilità di informazioni quantitative sull'evoluzione del territorio nell'arco temporale di almeno un decennio è stato infatti possibile verificare la perimetrazione dei fenomeni e soprattutto definirne il grado di attività in base alle velocità di spostamento superficiale rilevate. Senza l'apporto del dato PS un simile risultato poteva finora essere ottenuto solo dopo aver installato su ciascun fenomeno di interesse una rete di monitoraggio appropriata ed effettuato campagne di misura di medio-lungo periodo. Alcuni esempi, tratti dal recente censimento dei fenomeni franosi italiani effettuato nell'ambito del Progetto nazionale IFFI, verranno illustrati nella sezione 0.

Le informazioni basilari associate a ciascun PS, raccolte in file digitali (sezione 7), sono:

- la posizione del bersaglio a terra, ovvero le sue coordinate spaziali (latitudine/est, longitudine/nord, quota);
- la velocità media annua di spostamento (misurata lungo la congiungente sensore-bersaglio), espressa in mm/a, calcolata nell'intervallo di acquisizione delle immagini elaborate ed in relazione al punto di riferimento (sezione 0);
- la serie storica di spostamento, ossia una serie di valori che rappresenta, acquisizione per acquisizione, l'evoluzione dello spostamento subito da ciascun PS, espresso in mm e misurato nella direzione di vista del sistema.



Mentre la posizione del punto di misura, passibile di monitoraggio, è solitamente nota con una precisione di qualche metro, le velocità medie e le serie storiche degli spostamenti del terreno possono essere stimate con precisione millimetrica sul singolo PS (sezione 4).

2.1 Galleria di esempi

Nella presente sezione sono riportate immagini raffiguranti alcuni dei numerosi casi in cui è stata applicata la tecnica PS (per approfondimenti si rimanda il lettore alla sezione 9).

La Figura 13 mostra la griglia di PS rilevati sulla città di Bologna, notoriamente affetta da intensi fenomeni di subsidenza. L'interpretazione dei dati PS ha condotto all'individuazione di una zona in abbassamento molto estesa, con una marcata differenza tra il comportamento dell' area pianeggiante e quella appenninica.

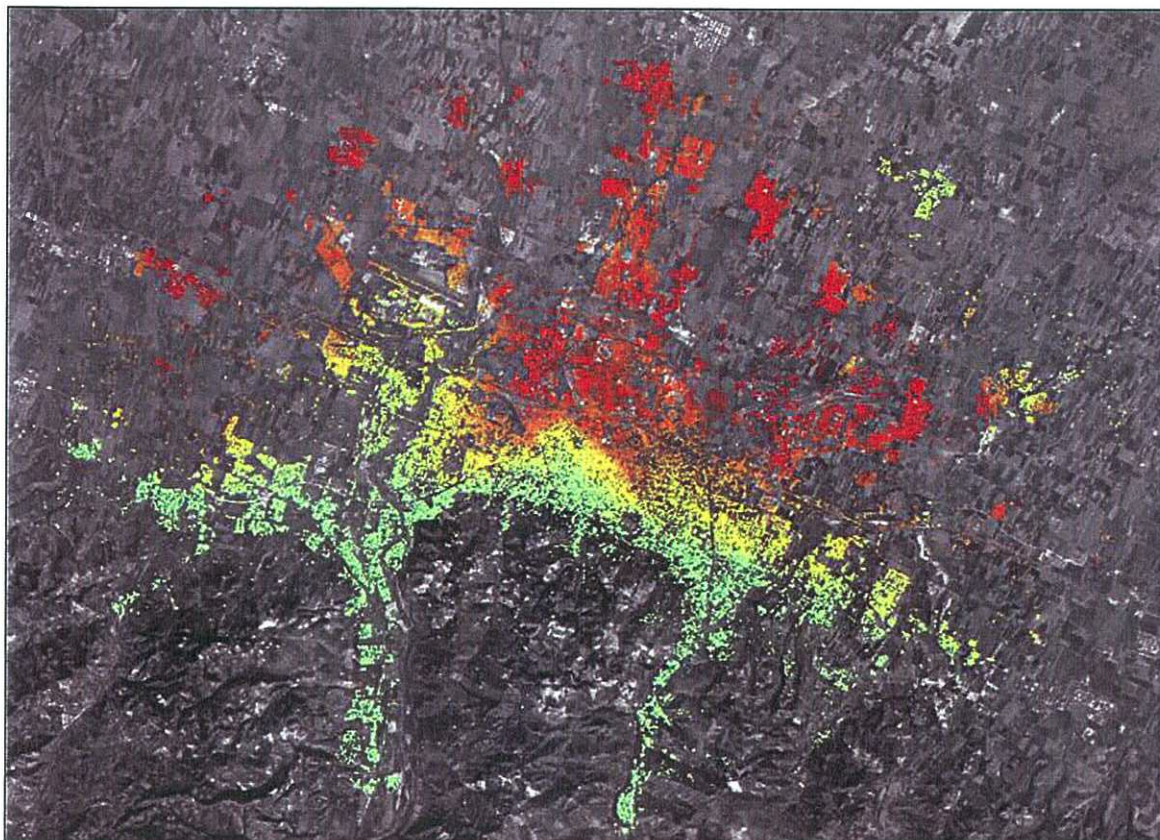


Figura 13: Esempio di applicazione di dati PS nello studio di fenomeni di subsidenza (Bologna, Italia). Velocità saturate tra -30 (rosso) e +30 mm/a (blu)

L'analisi PSInSAR™ consente lo studio dei fenomeni di instabilità di versante sia a livello di dettaglio sia di area vasta, anche in aree difficilmente accessibili in condizioni di sicurezza, dove un monitoraggio con le metodologie convenzionali sarebbe praticamente irrealizzabile. In Figura 14 sono riportati i risultati ottenuti da uno studio di dettaglio eseguito sul versante N del Monte Padrio Varadega (Valtellina), interessato da un fenomeno gravitativo di grandi dimensioni (30 km²); come si può osservare la densità superficiale dei PS è molto elevata e consente di discriminare le aree in movimento relativo.

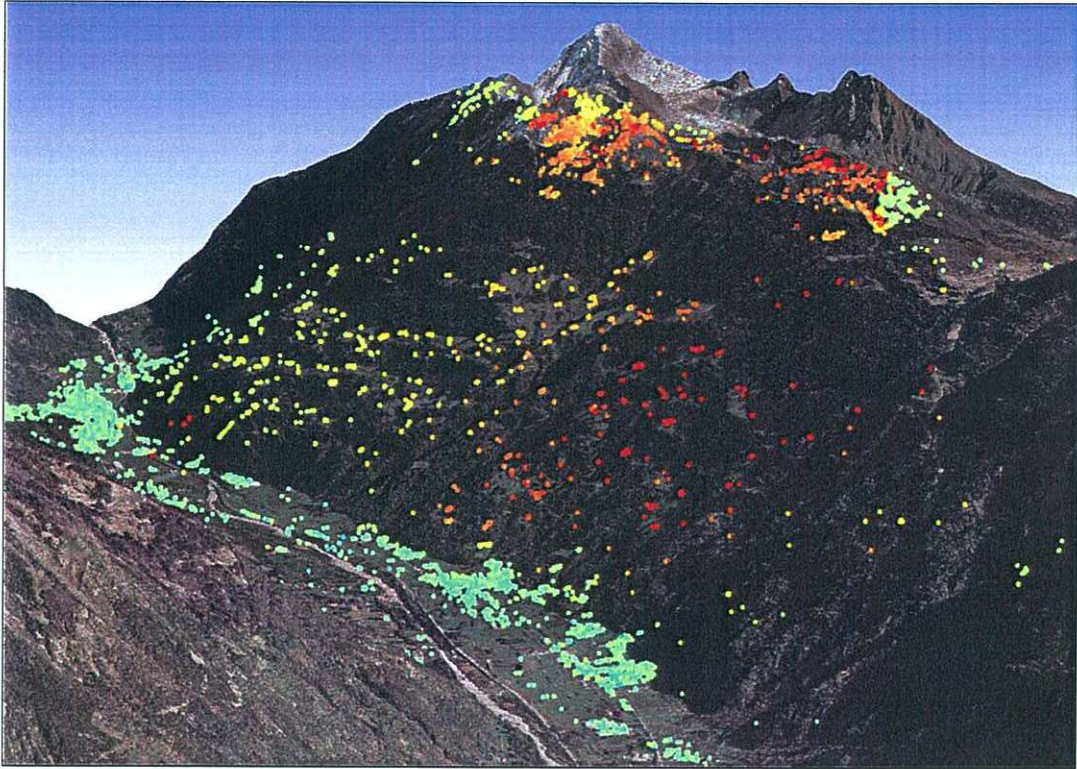


Figura 14: Esempio di applicazione di dati PS nello studio di fenomeni di instabilità di versante (Monte Padrio Varadega, Valtellina).

I dati PS permettono di monitorare l'evoluzione di aree vulcaniche e tettonicamente attive, solitamente soggette a fenomeni deformativi che la tecnica PS è in grado di rilevare con estrema precisione. A tal proposito, si riporta il caso esemplificativo del vulcano Etna (Figura 15).

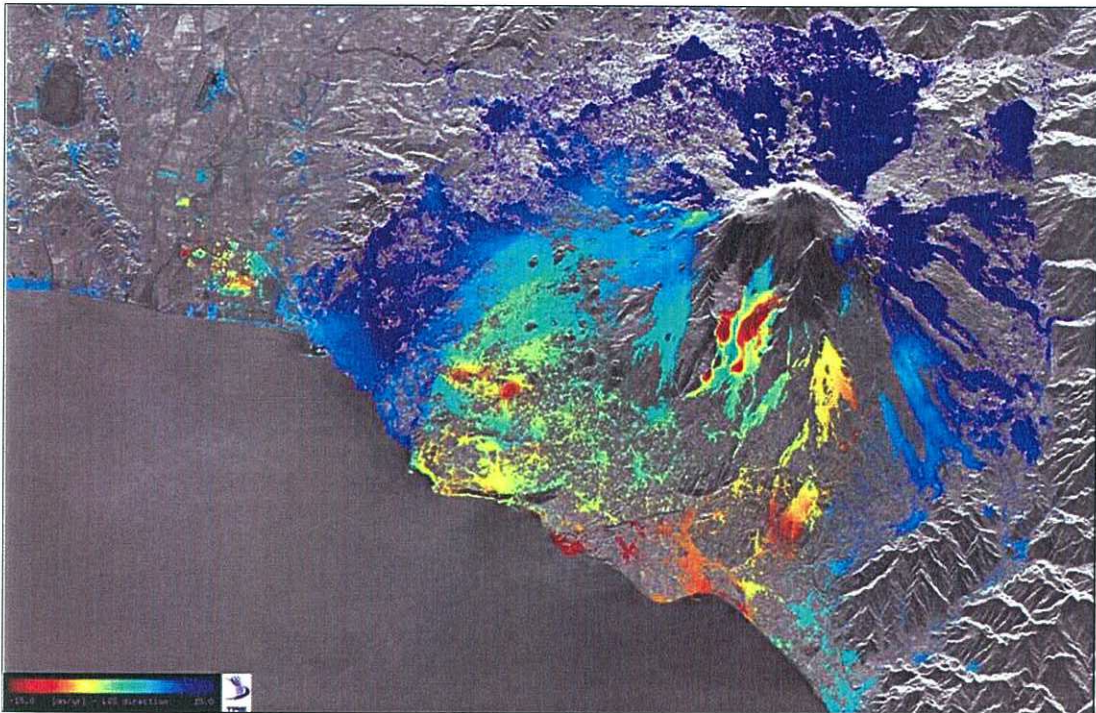


Figura 15: Esempio di applicazione di dati PS nello studio di fenomeni attivi in corrispondenza di aree vulcaniche (Etna, Sicilia).



La tecnica PS è uno strumento idoneo alla pianificazione di grandi opere infrastrutturali ed al monitoraggio dei fenomeni indotti dalla loro realizzazione, capace di fornire informazioni prima dell'inizio dei lavori (caratterizzazione del sito), in corso d'opera e dopo la loro ultimazione. La tecnica PS si pone quindi come efficace strumento operativo per valutazioni di impatto ambientale. La Figura 16 illustra un esempio evidente degli effetti derivanti dallo scavo di una tratta della rete metropolitana a Milano.

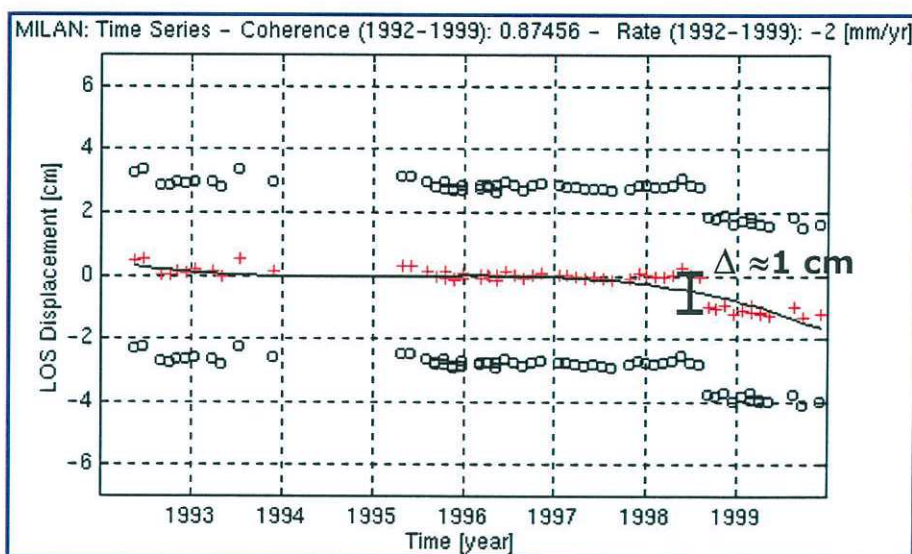


Figura 16: Esempio di applicazione di dati PS nel monitoraggio dei fenomeni indotti dalla realizzazione di grandi opere infrastrutturali (Milano).



L'analisi PSInSAR™ è stata utilizzata anche per accertare eventuali responsabilità in caso di danni provocati da lavori di costruzione. L'esistenza di un archivio storico di immagini ERS-ESA consente di verificare, congiuntamente a perizie strutturali *in situ*, i legami di causa-effetto tra lavori di costruzione ed eventuali danni subiti dagli edifici nelle zone limitrofe. La tecnica PS è uno strumento capace di compiere analisi retrospettive, da utilizzare anche in ambito giudiziario, come ha dimostrato il caso Rovigo (Figura 17).



1995: scavi per la costruzione di un parcheggio sotterraneo
Chiesa della Rotonda e altri monumenti danneggiati

Analisi PS
Serie storica delle deformazioni

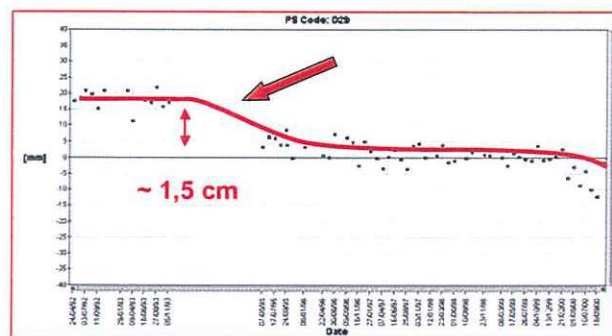


Figura 17: Esempio di applicazione di dati PS nello studio delle condizioni di instabilità di singoli edifici provocati da lavori di costruzione di un parcheggio sotterraneo (Rovigo).

In Figura 18 è illustrato un caso in cui i dati PS sono stati usati per verificare la stabilità di beni architettonici. La tecnica PS non sostituisce le perizie di tipo strutturale, ma costituisce una base informativa importante per individuare le porzioni su cui è necessario eseguire un'azione mirata ed immediata, riducendo di conseguenza i costi complessivi di intervento.

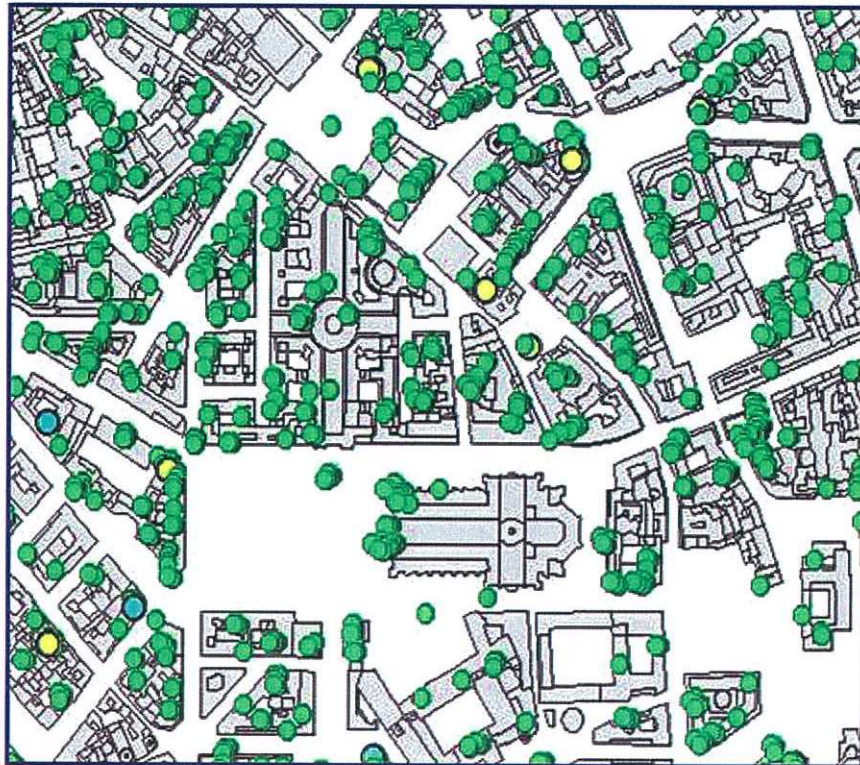


Figura 18: Esempio di applicazione di dati PS nello studio di stabilità di beni architettonici di particolare rilievo (Duomo, Milano).

3 Comprendere i Permanent Scatterers

Nella sezione 2 il concetto di diffusore permanente (*Permanent Scatterer, PS*) è stato introdotto in modo operativo, senza alcuna trattazione tecnica specifica. Una volta spiegato cosa sono fisicamente i *Permanent Scatterers* (sezione 3.1) verranno trattati due argomenti basilari per la comprensione dell'analisi PSInSAR™: la modalità di acquisizione dei dati PS (sezione 3.2) e la relatività delle misure (sezione 0).

3.1 Che cosa sono i *Permanent Scatterers*?

I PS corrispondono ad elementi artificiali o naturali già esistenti sulla superficie terrestre, quali ad esempio porzioni di edifici (terrazzi, tetti), monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, pali, strutture metalliche oppure affioramenti rocciosi, coni e falde detritiche.

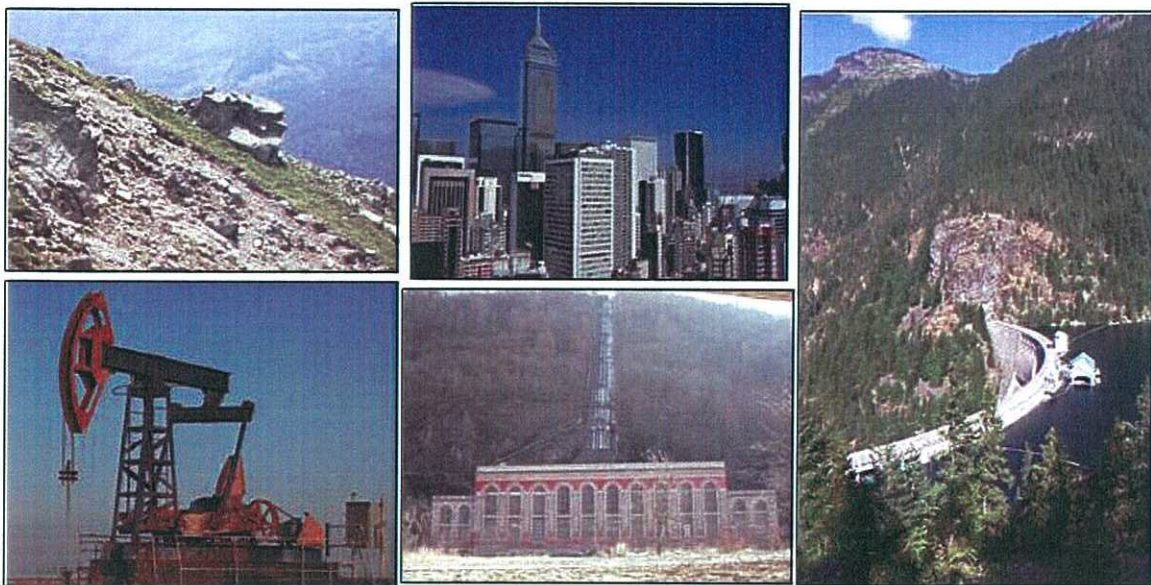


Figura 19: esempi di strutture o elementi naturali con comportamento PS

Si tratta dunque di oggetti già presenti sul terreno, che, illuminati dal satellite, restituiscono verso di esso un segnale di risposta elettromagnetica caratterizzato da una elevata stabilità nel tempo, proprietà che consente di identificare i bersagli a terra come *Permanent Scatterers*. Il sistema radar è in grado di determinare, ad ogni suo passaggio sull'area di interesse, la distanza esistente tra il sensore ed il bersaglio a terra (Figura 12). Se l'oggetto si trova in un'area sottoposta a fenomeni deformativi superficiali, il sensore rileverà tra una acquisizione e l'altra una variazione della distanza sensore-bersaglio lungo la linea di vista del satellite (LOS) e quindi il suo spostamento.

3.1.1 Quali fattori determinano la presenza dei PS sul territorio?

La distribuzione dei PS sulla superficie terrestre varia in funzione dei seguenti fattori:

- *uso del suolo*: in generale i valori di densità più elevati (>100 PS/km²) si riscontrano in corrispondenza dei centri urbani, caratterizzati da numerosi bersagli radar che preservano nel tempo le loro caratteristiche, mentre le aree vegetate o periodicamente innevate, le cui proprietà elettromagnetiche sono soggette a forti cambiamenti anche in brevi intervalli di tempo, non presentano PS al loro interno.

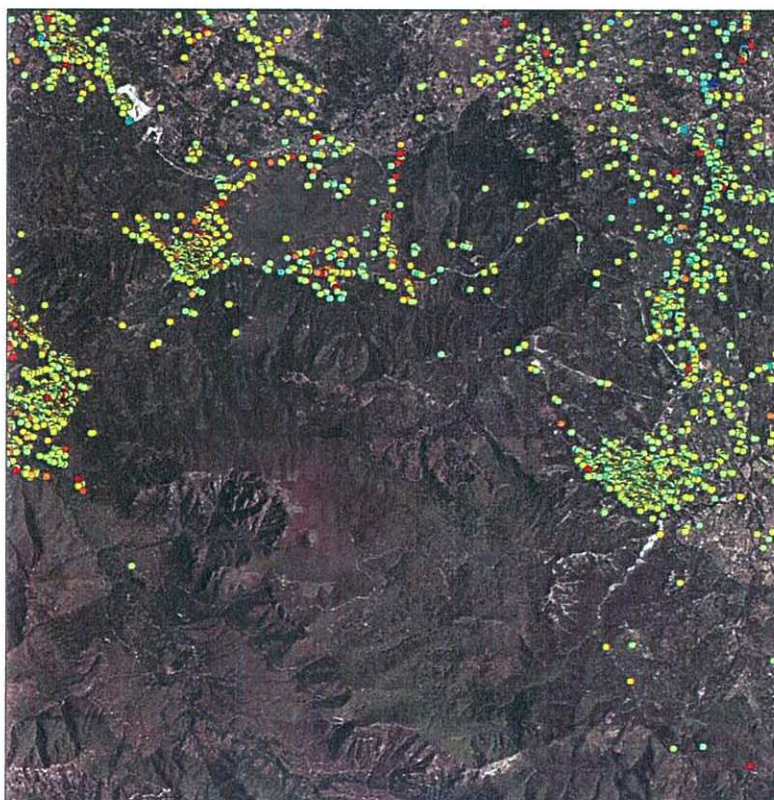


Figura 20: esempio di copertura PS. Risulta evidente la concentrazione dei PS sulle zone urbanizzate mentre le zone vegetate non risultano coperte da punti di misura.

- *topografia dell'area investigata*: le immagini radar di zone con morfologia prevalentemente montuosa sono affette da una serie di distorsioni geometriche derivanti dalla particolare interazione tra il segnale elettromagnetico inviato dal satellite (lungo una linea di vista inclinata) e la superficie topografica (nello specifico, pendenza ed esposizione del versante rispetto al sensore). Due sono le situazioni

che precludono la possibilità di trovare PS: quando il versante risulta nascosto alla vista del satellite oppure quando ha una pendenza tale da determinare la sovrapposizione dei segnali di risposta degli oggetti a terra e quindi una non corretta interpretazione del segnale. Tali effetti legati alle deformazioni prospettive sono già stati illustrati nella sezione 1.7 e sono sinteticamente rappresentati in Figura 21.

- *tipo di sensore*: di fatto si osserva che la densità dei PS varia in funzione dei peculiari parametri di funzionamento che contraddistinguono i vari sensori come ad esempio frequenza delle acquisizioni e risoluzione a terra del sensore.

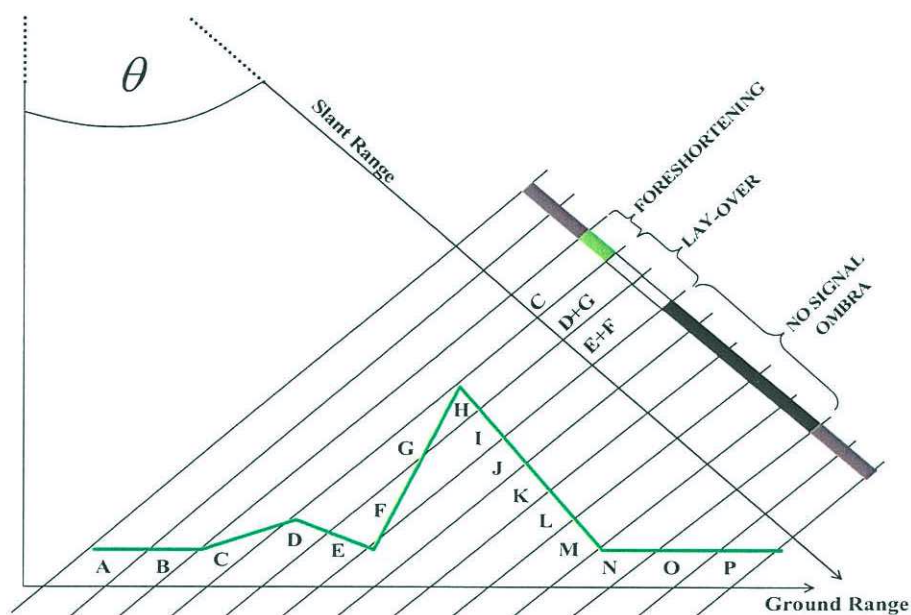


Figura 21: fenomeni legati alla deformazione prospettica

Esistono altre condizioni oltre a quelle citate che determinano l'assenza di PS in aree teoricamente favorevoli:

- *variazione delle proprietà elettromagnetiche del bersaglio radar nell'intervallo di acquisizione*: esistono particolari tipologie di bersagli radar che si comportano come PS solo in un sottoinsieme dell'intervallo di acquisizione chiamati PS temporanei e semi-PS. I PS temporanei sono punti che nelle immagini del dataset compaiono ad intermittenza, come luci che si accendono e si spengono ripetutamente. Tipico esempio di PS temporaneo è rappresentato dalle aree in alta montagna che nella stagione invernale sono innevate e di conseguenza non presentano PS, mentre in primavera ed estate dopo la fusione del manto nevoso mostrano affioramenti rocciosi, coni e falde detritiche, ottimi diffusori del segnale radar; quindi, nelle immagini del dataset, che solitamente copre un arco temporale di vari anni, i diffusori a terra appaiono e scompaiono a seconda della stagione. I semi-PS sono bersagli radar che compaiono o scompaiono da un certo momento in poi, come può accadere



nel caso di un edificio costruito su un'area che in precedenza era vegetata oppure la cui struttura subisce sostanziali modifiche o viene demolita.

- *entità del moto dell'oggetto a terra*: il fatto che il bersaglio a terra sia soggetto ad uno spostamento molto veloce (con velocità superiore a 20 cm/anno) può portare il sistema a non riconoscere l'oggetto stesso come *Permanent Scatterer* e quindi impossibilitandone di fatto il monitoraggio.

Nel primo caso, depurando il dataset complessivo dalle immagini acquisite in presenza del manto nevoso o limitando l'analisi a un periodo di tempo più ristretto, si può recuperare informazione sui PS temporanei o sui semi PS. Questa operazione può presentare dei limiti dovuti al numero minimo di immagini necessarie per un'elaborazione statistica robusta.

3.1.2 Riflettori artificiali

Nel caso in cui in un'area di interesse non si individuino Permanent Scatterers già esistenti al suolo, oppure particolari edifici o strutture non abbiano caratteristiche tali da risultare monitorabili, è possibile installare degli oggetti metallici progettati in modo tale da creare dei punti di misura. Questi particolari manufatti sono chiamati riflettori artificiali.

La loro forma e dimensione è studiata per poter fornire una risposta radar ben visibile e stabile nel tempo. Proprio grazie a queste caratteristiche elettromagnetiche, ciascun riflettore artificiale installato permette di fornire delle misure di spostamento che, per il principio di funzionamento del sistema SAR satellitare, sono sempre rilevate lungo la linea di vista del sensore (ovvero la congiungente satellite-riflettore artificiale).

La serie storica di deformazione corrispondente ad un riflettore artificiale ha come origine temporale la prima acquisizione SAR disponibile dopo averne effettuato l'installazione.

I principali vantaggi consistono nel fatto che si tratta di oggetti di semplice costruzione e passivi, ovvero una volta posizionati non richiedono alcuna alimentazione o manutenzione. Le procedure di installazione, inoltre, sono piuttosto semplici anche se è richiesta una buona precisione (alcuni gradi) per il puntamento in direzione dei sensori.

In conclusione, l'installazione di riflettori artificiali in un'ottica di prevenzione di medio-lungo periodo può risultare una strategia vincente per il monitoraggio, negli anni a venire, di particolari edifici o strutture o versanti in frana.

Nel seguito verranno brevemente descritti due modelli di riflettore artificiale ed i risultati di una sperimentazione in campo di queste strutture.

Successivamente, saranno presentati alcuni esempi di installazione di riflettori artificiali in differenti tipi ambiente.

3.1.3 Esperimento con riflettori artificiali

Come verifica delle prestazioni di un sistema di monitoraggio da satellite basato sull'utilizzo di riflettori artificiali, è stato progettato e realizzato uno specifico esperimento.

Scopo di questo test, svolto in collaborazione tra TRE e CESI Ricerca, è stato quello di valutare la precisione delle stime di spostamento ottenibili mediante misure interferometriche ricavate da dati reali e non simulati. Inoltre, si è voluta dimostrare la possibilità di combinare differenti dati radar relativi allo stesso bersaglio a terra per ottenere misure di spostamento lungo la direzione verticale e longitudinale.

A tal fine sono stati installati sul tetto di un edificio di Milano due coppie di riflettori artificiali, ciascuna delle quali risultava essere visibile dal satellite durante la sua orbita sia ascendente che discendente. In aggiunta, una coppia è stata dotata di un particolare meccanismo per permettere di imporre degli spostamenti controllati. Per ridurre il più possibile il peso e l'ingombro dei riflettori artificiali, si è deciso di utilizzare dei diedri (costituito da due superfici metalliche quadrate, disposte a 90 gradi). In Figura 22 viene mostrata a titolo di esempio la coppia di diedri con piattaforma mobile.



Figura 22: Coppia di riflettori artificiali usati durante l'esperimento. Il basamento di questa struttura è dotato di un meccanismo di movimentazione in direzione verticale e longitudinale.

Per la durata di quasi un anno, sono state elaborate un totale di 24 scene Radarsat (12 acquisite in geometria ascendente e 12 in geometria discendente). Senza nessuna informazione a priori sugli spostamenti imposti, ma utilizzando unicamente i dati SAR disponibili, è stata ricostruita la serie storica di deformazione associata alla coppia di riflettori mobile. Le misure di spostamento così ricavate sono state quindi confrontate con i valori effettivamente attribuiti ai riflettori artificiali nelle due direzioni.



Il confronto tra le serie di deformazione reale e quella ottenuta dalle misure interferometriche in entrambe le direzioni, ha permesso di dimostrare che questa tecnica permette di stimare degli spostamenti con precisione sub-millimetrica.

Sebbene l'esperimento sia stato condotto in condizioni tali da non richiedere la stima e la rimozione del disturbo atmosferico (i riflettori artificiali sono posizionati a brevissima distanza tra loro), i risultati mettono in ogni caso in evidenza come sia possibile ottenere delle misure affidabili dal dato SAR, a patto di compensare correttamente tutti i termini di disturbo sovrapposti al segnale.

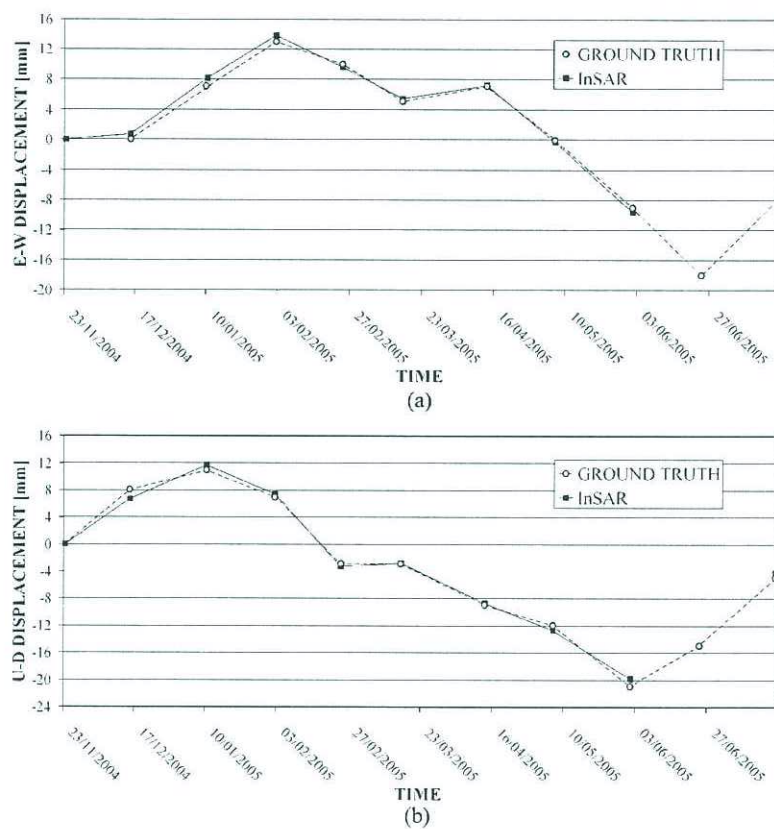


Figura 23: Confronto tra la serie storica di deformazione imposta alla coppia di riflettori mobile ("round truth") e quella ricavata elaborando il dato SAR("InSAR"). (a) Spostamento in direzione Est-Ovest. (b) Spostamento in direzione verticale.

3.1.4 Esempi di applicazione

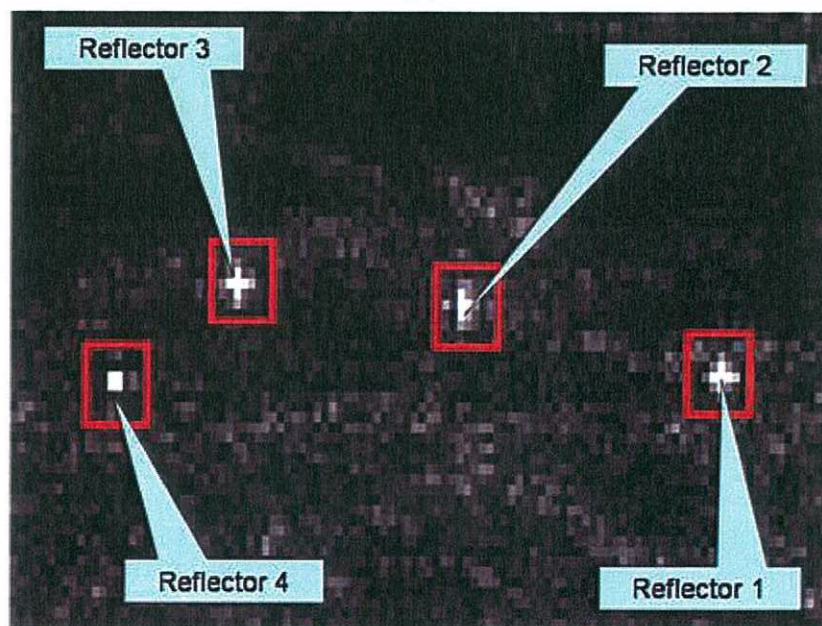
Nel seguito vengono proposti alcuni esempi di installazione di riflettori artificiali per il monitoraggio di precise strutture o di particolari aree di interesse.



Figura 24: Coppia di corner reflector montati in configurazione tale da essere contemporaneamente visibile dal satellite in modalità ascendente e discendente. Sul basamento comune è stata predisposta un'antenna GPS. Attraverso questo schema di installazione è possibile rendere "assolute" tutte le misure PS che, invece, per loro natura sono di tipo differenziale.



(a)



(b)

Figura 25: Triedri rettangolari del tipo mostrato in Figura 15 per il monitoraggio della stabilità di un terrapieno sito in Indonesia. (a) Foto aerea della zona di interesse con indicate le posizioni dei triedri installati. (b) Mappa di riflettività che mostra l'ampiezza della risposta radar secondo una scala di grigi: i pixel più luminosi sono quelli contraddistinti da un più elevato segnale di ritorno.

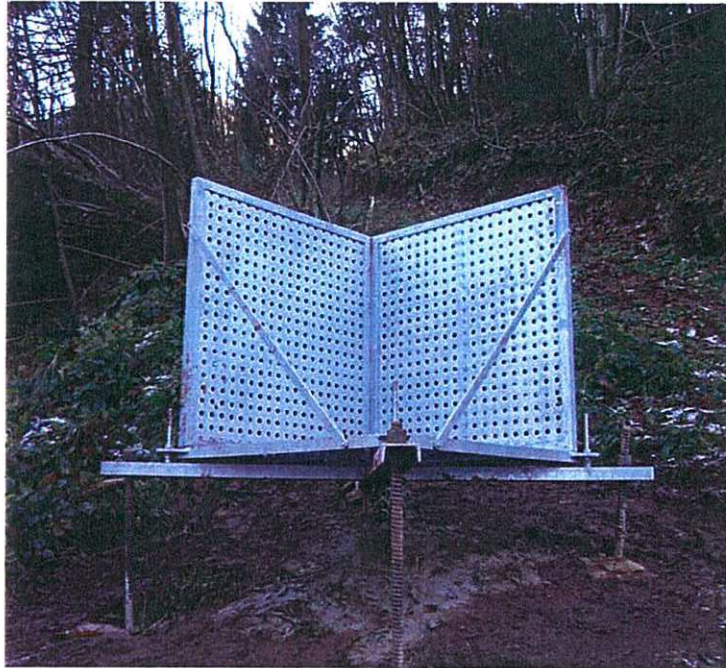


Figura 26: Esempio di installazione di diedro quadrato in ambiente montuoso per il monitoraggio di un versante in frana.



Figura 27: Riflettori artificiali (di tipo diedro rettangolare) per il monitoraggio della stabilità di una struttura (condotta forzata) in ambiente montuoso.



3.1.5 Strategia di monitoraggio con riflettori artificiali

In termini generali, è possibile suddividere l'esecuzione di un progetto di monitoraggio mediante riflettori artificiali in tre fasi distinte:

1. definizione dei requisiti minimi per l'analisi;
2. installazione dei riflettori artificiali;
3. stima degli spostamenti.

Durante la prima fase devono essere adeguatamente valutati i seguenti parametri:

- la geometria o le geometrie di acquisizione da utilizzare per l'analisi;
- il numero di oggetti da installare per garantire una densità di punti di misura sufficiente a coprire l'area di interesse;
- la tipologia di riflettore artificiale da utilizzare (ad esempio, triedro rettangolare o triedro triangolare);
- la posizione ove interessa ottenere un punto di misura (verifica della compatibilità con eventuali vincoli ambientali).

Una volta definiti questi parametri è possibile procedere alla fase successiva di installazione dei riflettori artificiali. Solo al termine di questa operazione si potranno effettuare delle stime di spostamento sui riflettori artificiali elaborando le immagini SAR acquisite sull'area.

In linea di principio, è possibile fornire un aggiornamento della misura di deformazione ad ogni nuova acquisizione del satellite (24 giorni per il satellite Radarsat).

Il monitoraggio mediante questa tecnica è pur sempre limitato a tutti quei fenomeni che esibiscono una massima velocità di deformazione inferiore a circa 2 cm al mese.

3.2 Che cosa misurano i PS?

Questa sezione presenta un argomento chiave del manuale, in cui verranno illustrate le differenti geometrie con cui viene acquisito il dato PS e le problematiche ad esse legate, cercando di rispondere ai quesiti più frequenti proposti dall'utente, specialmente sulla combinazione dei dati ascendenti e discendenti.

I satelliti attualmente disponibili per l'acquisizione di immagini SAR percorrono ripetutamente una traiettoria fissa attorno alla Terra, inclinata di pochi gradi rispetto ai meridiani, ad una altezza dalla superficie terrestre di circa 800 km.

Mentre il satellite percorre la sua orbita, la Terra ruota intorno al proprio asse. La particolare combinazione dei due moti permette al sensore di rilevare la stessa area geografica con due differenti geometrie (Figura 28):

- in modalità ascendente, ossia percorrendo l'orbita da S verso N ed illuminando l'area da W verso E;
- in modalità discendente, ossia percorrendo l'orbita da N verso S ed illuminando l'area da E verso W.

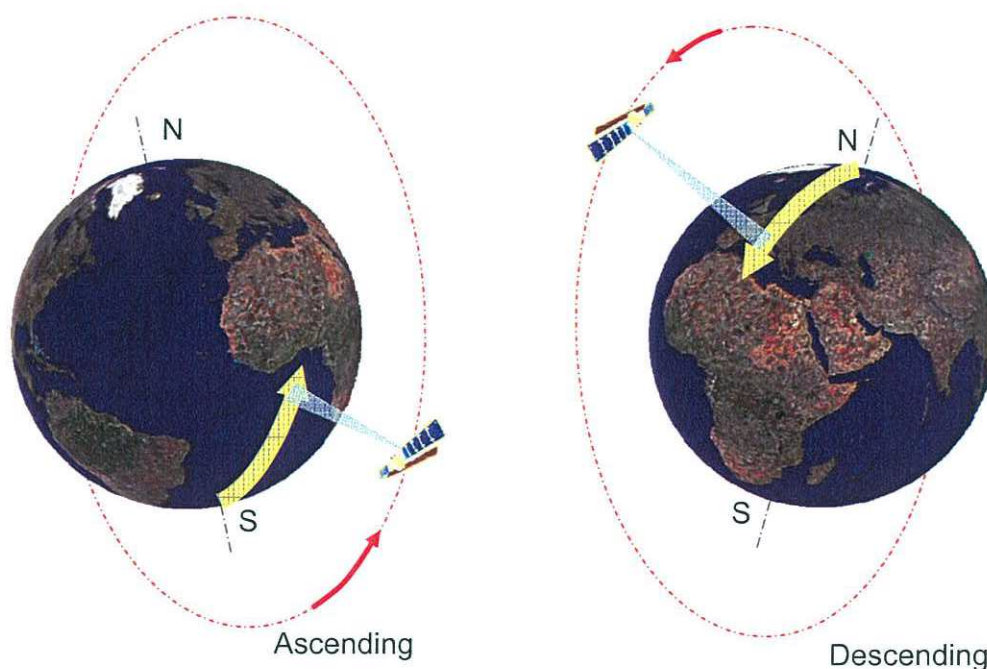


Figura 28: modalità di acquisizione. A sinistra modalità ascendente, a destra modalità discendente.

I sistemi radar inviano impulsi elettromagnetici lateralmente (a differenza dei sensori ottici che li acquisiscono in verticale), lungo una linea inclinata di un angolo θ rispetto alla verticale, che prende il nome di *Line Of Sight, LOS*.

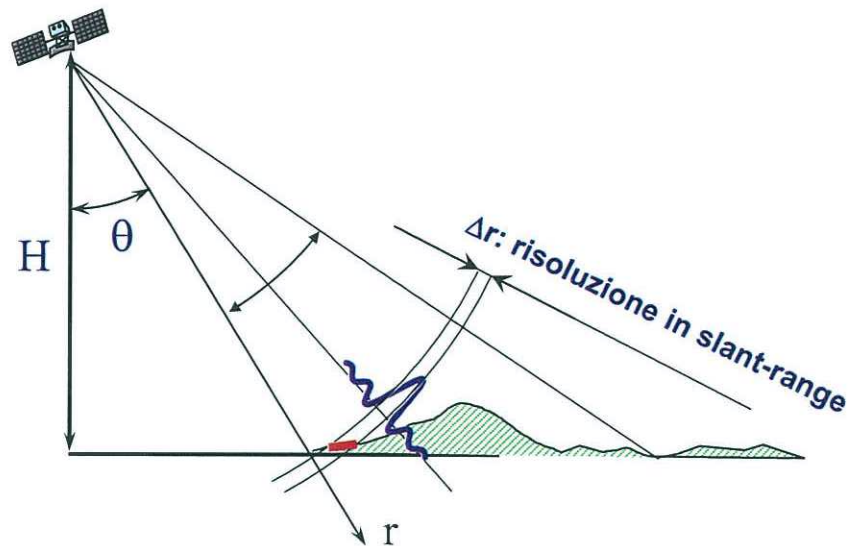


Figura 29: Line Of Sight. Direzione, inclinata di θ rispetto alla verticale, lungo la quale il sensore misura gli spostamenti.

Facendo riferimento alla Figura 21 e alla Figura 29 si comprende come questa configurazione geometrica fa sì che i versanti esposti verso E siano ben visibili in geometria ascendente mentre quelli con esposizione verso W siano rilevati dal sensore in modalità discendente (a meno che porzioni di territorio non risultino nascoste alla vista del satellite, come già menzionato nella sezione 3.1.1). In Figura 30 sono riportati graficamente questi effetti e si può notare come in caso di versanti esposti in direzione est o ovest risulti fondamentale un'attenta scelta della geometria di acquisizione. Per quanto riguarda i versanti esposti a nord o sud, questi risultano visibili in entrambe le geometrie.

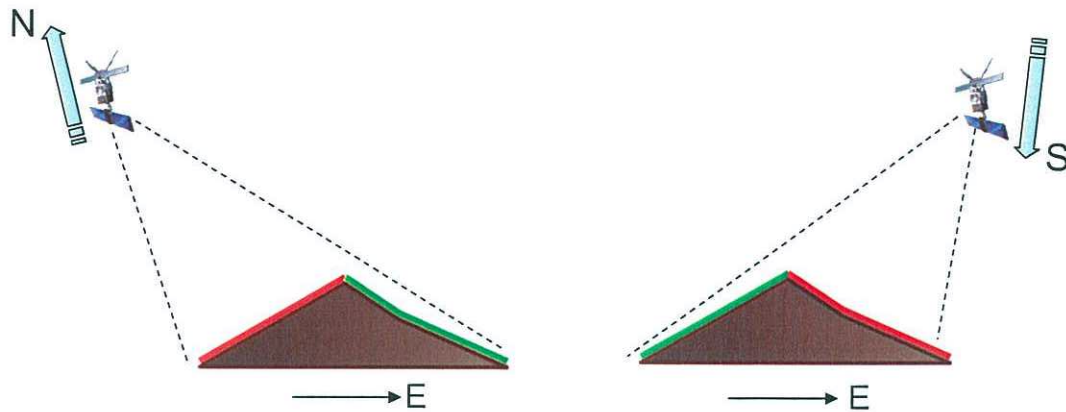


Figura 30: versanti monitorabili con le due diverse geometrie di acquisizione. A sinistra è illustrata la geometria ascendente mentre a destra quella discendente. In verde sono evidenziati i versanti monitorabili in rosso quelli non rilevati.

3.2.1 Misure lungo la congiungente sensore-bersaglio

La tecnica PS è in grado di misurare la componente dello spostamento, a cui è sottoposto l'oggetto a terra, lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS). Per un dato PS, questo valore è tanto minore quanto più la direzione del vettore spostamento reale si discosta dalla direzione di puntamento del sensore; al limite, nel caso di moto perpendicolare alla linea di vista del satellite, lo spostamento misurato risulta essere nullo. In Figura 31 sono rappresentati tre casi che illustrano come al variare della direzione reale del moto (vettore rosso) il sistema misuri una componente, lungo la LOS, (vettore blu) che può variare notevolmente in modulo e avere segni opposti. Si ricorda che la componente del moto lungo la direzione N-S non è rilevabile dai sistemi SAR proprio per la geometria di acquisizione descritta.

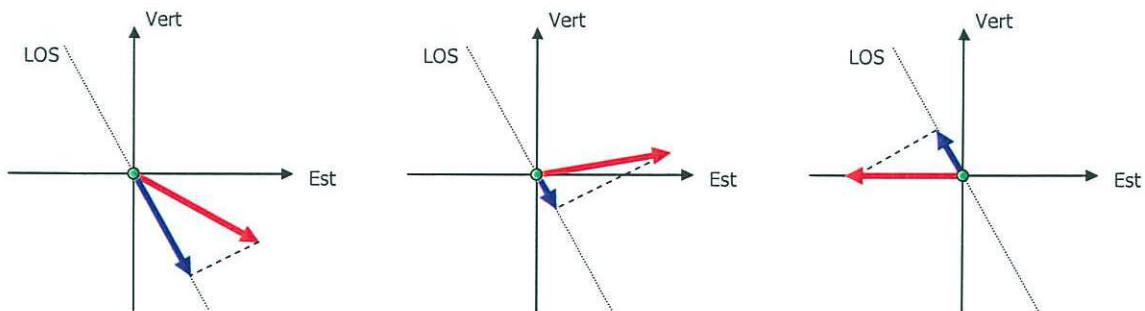


Figura 31: componente di spostamento rilevata dal sensore in funzione delle diverse direzioni dello spostamento reale. In rosso è rappresentato il vettore di spostamento reale mentre in blu quello rilevato dal sistema.

I dati SAR, siano essi acquisiti in geometria ascendente o discendente, sono elaborati mediante l'algoritmo PSInSAR™ in modo da fornire la velocità media annua di ogni PS, calcolata a partire dai valori di spostamento misurati lungo la linea di vista del sensore, acquisizione dopo acquisizione.

I vettori di velocità stimati nelle due differenti geometrie (rispettivamente, ascendente V_a e discendente V_d) possono mostrare modulo e verso differenti in base al tipo di fenomeno deformativo superficiale in essere. Nel caso si disponga su una stessa area sia dell'elaborazione ascendente che discendente, visualizzati entrambi i campi di velocità, l'utente può osservare notevoli differenze fra i due risultati sia in termini di intensità che di segno (per convenzione, il segno positivo o negativo assegnato alle misure di spostamento o di velocità si riferisce a moti rispettivamente in avvicinamento o in allontanamento dal satellite). Tale evidenza si spiega col fatto che il sensore nelle due geometrie rileva il moto dell'oggetto osservato a terra in maniera diversa.

Per capire meglio, esaminiamo due tipologie di movimento: moto puramente verticale e moto puramente orizzontale in direzione E-W.

Supponiamo che nella realtà il bersaglio a terra sia soggetto al solo abbassamento verticale (per semplicità di calcolo consideriamo uno spostamento effettivo, DREALE, di 1 cm) e di utilizzare il sensore ERS come sistema di telerilevamento (angolo di incidenza, θ , pari a 23° per entrambe le geometrie).

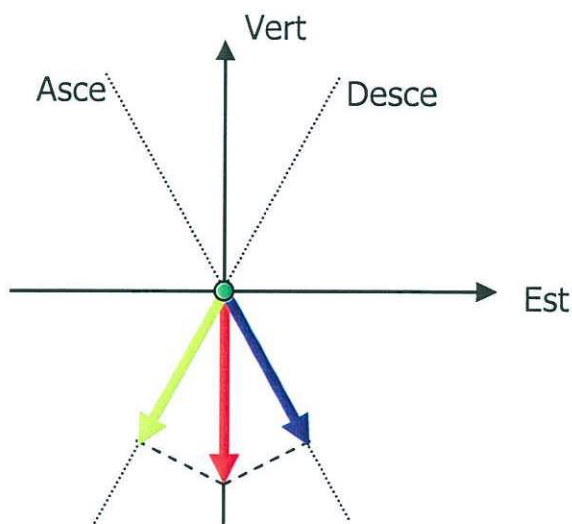


Figura 32: esempio di moto puramente verticale. In rosso è riportato lo spostamento reale del PS mentre in blu e giallo rispettivamente le componenti ascendente e discendente stimate

Sotto queste condizioni, il verso del movimento percepito dal sensore ERS è lo stesso sia in modalità ascendente sia discendente (Figura 32); in particolare, in ciascuna delle due geometrie il modulo dello spostamento rilevato, indicato con D_{LOS} , è dato da:

$$D_{LOS} = D_{REALE} \cdot \cos \theta = 1 \cdot \cos 23^\circ = 0.92 \text{ cm}.$$

Dunque, in questo esempio il sensore rileva in entrambe le geometrie un movimento di allontanamento dell'oggetto (valori negativi di velocità).

Nel caso in cui si verifichi un sollevamento verticale, il sensore rileva in entrambe le geometrie di vista uno spostamento D_{LOS} di pari ampiezza (se lo spostamento D_{REALE} vale 1 cm, analogamente a prima, il vettore D_{LOS} ha modulo pari a 0.92 cm), che però esso percepisce come un avvicinamento del bersaglio (valori positivi di velocità).

Diversamente, un moto nel piano orizzontale in direzione E-W è caratterizzato da valori di spostamento con verso opposto nelle due distinte geometrie. A titolo di esempio, consideriamo un oggetto che si muove nel piano orizzontale da W verso E (Figura 33); in geometria ascendente verrà osservato un aumento della distanza sensore-bersaglio (valore negativo di velocità); al contrario, in modalità discendente il sensore misura una diminuzione della distanza, che risulta come un avvicinamento del bersaglio al satellite (valore positivo della velocità).

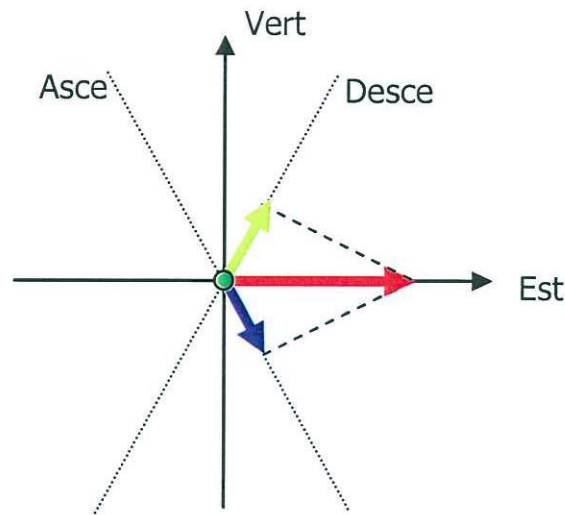


Figura 33: esempio di moto puramente orizzontale. In rosso è riportato lo spostamento reale mentre in blu e giallo rispettivamente le componenti ascendente e discendente.

Nell'ipotesi di uno spostamento puramente orizzontale D_{REALE} di 1 cm da W verso E, il modulo del vettore D_{LOS} vale in entrambe le geometrie :

$$D_{LOS} = D_{REALE} \cdot \sin \theta = 1 \cdot \sin 23^\circ = 0.39 \text{ cm} ,$$

ma la componente ascendente V_a della velocità avrà segno negativo e quella discendente V_d positivo.

L'utente non deve quindi stupirsi se l'area di interesse mostra alcuni PS con valori di velocità V_a e V_d di segno opposto. Anzi, questa circostanza permette di individuare a prima vista se il fenomeno investigato comporta l'esistenza di componenti del moto anche in direzione orizzontale.

In Figura 34 è riportato un esempio relativo ad un'area in frana. Osservando le due immagini risulta evidente come sullo stesso versante i valori di velocità V_a e V_d assumano segno opposto. Ciò è dovuto al fatto che in geometria ascendente il satellite rileva un avvicinamento nel tempo del bersaglio radar ed un allontanamento in configurazione discendente. Per questa ragione è consigliabile visualizzare in ambiente GIS, con una simbologia diversa, i due dataset, ascendente e discendente, così da non confondere i due tipi di informazione.

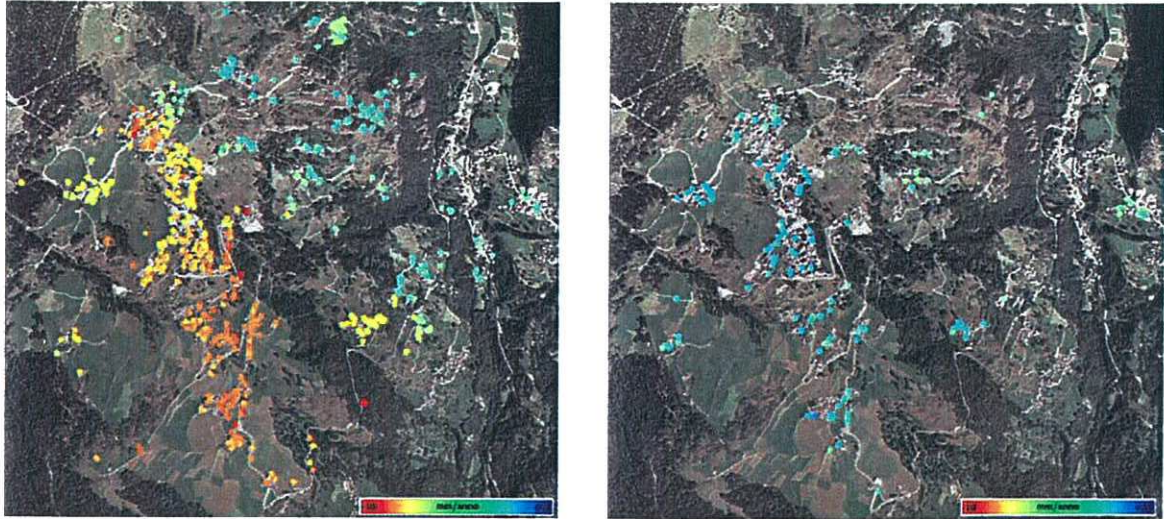


Figura 34: Visualizzazione dei dati PS su un versante esposto verso E soggetto a movimenti con elevata componente orizzontale in direzione E-W: (sx) campo di velocità dei PS rilevati in geometria ascendente (punti in allontanamento dal satellite, velocità negative); (dx) campo di velocità dei PS rilevato in geometria discendente (punti in avvicinamento al satellite, velocità positive).

Nelle argomentazioni esposte finora abbiamo considerato come sistema di telerilevamento solo il sensore ERS. C'è un altro aspetto da considerare, ossia che sensori differenti forniscono per lo stesso fenomeno deformativo misure diverse dal momento che cambiano i parametri di puntamento del satellite. Ad esempio, il sensore RADARSAT, il quale presenta un angolo di incidenza maggiore rispetto ad ERS (circa 34° in modalità *Standard S3* e valori compresi tra 37° e 48° in modalità *Fine Beam*), è più sensibile al rilevamento dei moti orizzontali, in quanto la percentuale della componente orizzontale del moto misurata da RADARSAT è maggiore di quella misurata da ERS.

Sotto le stesse ipotesi dell'esempio fatto precedentemente per ERS per un moto puramente orizzontale D_{REALE} di 1 cm da W verso E, nel caso di osservazioni effettuate con RADARSAT in modalità *Standard S3* il modulo del vettore D_{LOS} vale:

$$D_{LOS} = D_{REALE} \cdot \sin \theta = 1 \cdot \sin 34^\circ = 0.56 \text{ cm},$$

ossia maggiore di circa il 44% rispetto a quanto calcolato con ERS.

In generale, nell'utilizzo congiunto di dati PS acquisiti da sensori differenti (ERS, ENVISAT E RADARSAT) bisogna prestare massima attenzione a causa sia della non coincidenza dei periodi di acquisizione (i dati di ERS utilizzati si riferiscono fino a gennaio 2001, mentre quelli RADARSAT sono stati acquisiti da aprile 2003 ad oggi) sia dei diversi parametri di puntamento dei sensori (angoli di incidenza differenti).

3.2.2 Combinazione dei dati PS ascendenti e discendenti

Un aspetto interessante della tecnica PS consiste nella possibilità di combinare il dataset ascendente con quello discendente (qualora per l'area in esame si disponga di dati acquisiti dal sensore radar sia in geometria ascendente sia discendente) perché permette di risalire all'orientazione del vettore velocità nel piano EST, HEIGHT come illustrato di seguito. Si ricorda che un eventuale spostamento in direzione N-S non può essere rilevato per ragioni intrinseche alla geometria del sistema (cfr.3.2.1).

Il problema può essere compreso meglio se inquadrato da un punto di vista geometrico. Si consideri a tal proposito un sistema di riferimento cartesiano x, y, z , in cui le tre direzioni coincidono nella realtà rispettivamente con quella orizzontale E-W, orizzontale N-S e verticale.

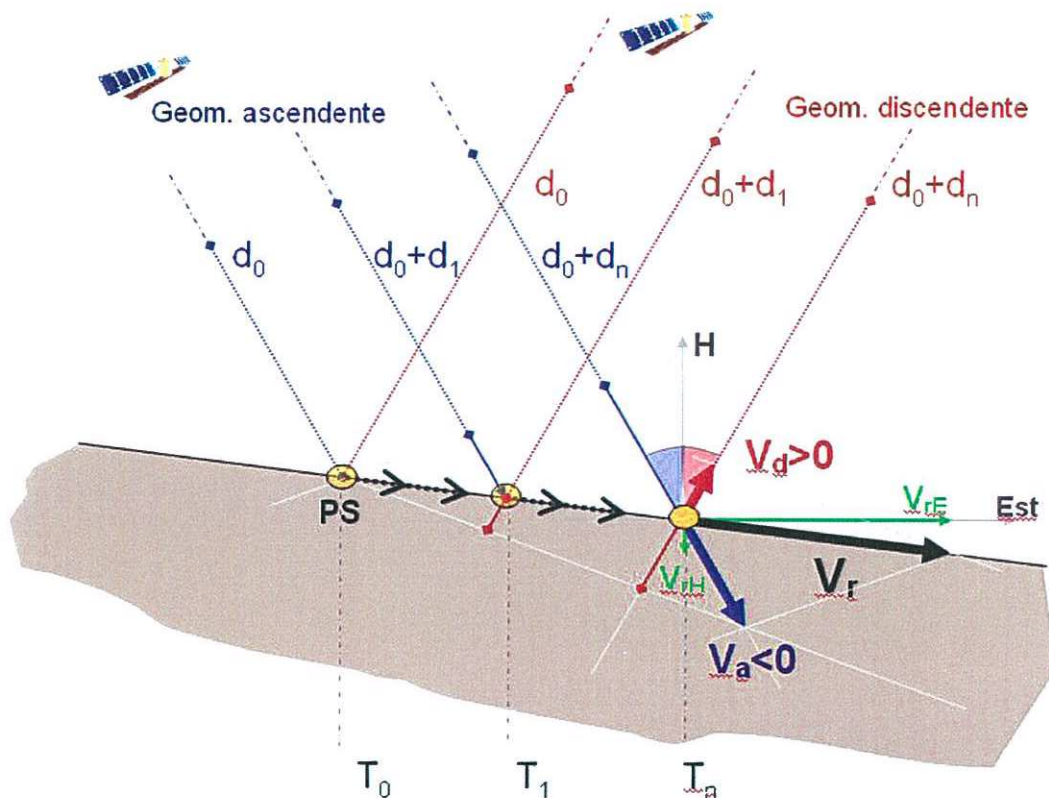


Figura 35: Esempio di scomposizione del moto combinando i dati di velocità ascendente e discendente

Si consideri un PS, corrispondente alla stessa struttura a terra, individuato sia nel dataset discendente sia in quello ascendente. La tecnica PS fornisce per questo elemento le corrispondenti velocità V_a e V_d rilevate dai due diversi punti di vista.



Nel sistema di riferimento x, y, z, il vettore velocità V può essere espresso in generale come:

$$\vec{V} = V_x \cdot \vec{s}_x + V_y \cdot \vec{s}_y + V_z \cdot \vec{s}_z,$$

dove V_x , V_y e V_z sono le componenti del vettore velocità V lungo le direzioni orizzontale E-W, orizzontale N-S e verticale e s_x , s_y , s_z i versori dei tre assi coordinati del sistema cartesiano.

I dati orbitali del satellite consentono di stabilire l'orientamento nel sistema di riferimento x, y, z della congiungente sensore-bersaglio (LOS) nelle due differenti geometrie e quindi i coseni direttori dei rispettivi vettori V_a e V_d . Dunque, utilizzando le stime di velocità derivanti dall'elaborazione delle due diverse geometrie di acquisizione (ascendente e discendente), si può scrivere il seguente sistema:

$$\begin{cases} V_a = V_x \cdot s_{xasce} + V_y \cdot s_{yasce} + V_z \cdot s_{zasce} \\ V_d = V_x \cdot s_{xdesce} + V_y \cdot s_{ydesce} + V_z \cdot s_{zdesce} \end{cases},$$

in cui s_{xasce} , s_{yasce} , s_{zasce} e s_{xdesce} , s_{ydesce} , s_{zdesce} rappresentano i coseni direttori dei rispettivi vettori velocità V_a e V_d e quindi i coseni degli angoli che il vettore V_a o V_d , misurato lungo la LOS, forma con i tre assi coordinati.

Come si può osservare nel precedente sistema il numero di incognite (V_x , V_y e V_z) è superiore a quello delle equazioni e quindi esso non è risolvibile. Tuttavia, dal momento che il sensore risulta molto poco sensibile agli spostamenti in direzione N-S (coincidente con la direzione y), considerare il moto in questa direzione uguale a zero ($V_y=0$) è un'approssimazione accettabile e permette di risolvere il precedente sistema in modo da risalire all'entità delle componenti del moto in direzione E-W e in direzione verticale (corrispondenti alle direzioni x e z).

È importante specificare che, per le caratteristiche orbitali (inclinazione dell'orbita rispetto ai meridiani terrestri) e di acquisizione del segnale (vista del satellite laterale ed inclinata), il sensore durante una data acquisizione è in grado di misurare le componenti del moto effettivo prevalentemente nelle direzioni orizzontale E-W e verticale, mentre la componente del moto rilevata nella direzione orizzontale N-S è minima risultando quindi trascurabile anche in presenza di forti spostamenti in direzione N-S.

In definitiva, sotto l'ipotesi di spostamento nullo in direzione N-S, noti i parametri di puntamento del satellite (ossia, i coseni direttori) al momento dell'acquisizione nelle due rispettive geometrie e a condizione che i valori ascendente e discendente della velocità siano riferiti allo stesso bersaglio radar, è possibile calcolare le componenti verticale, V_v , ed orizzontale in direzione E-W, V_E , del vettore velocità reale esplicitando il precedente sistema nella forma:

$$\begin{cases} V_a = V_v \cdot \cos \theta_{asce} + V_E \cdot \sin \theta_{asce} \\ V_d = V_v \cdot \cos \theta_{desce} + V_E \cdot \sin \theta_{desce} \end{cases},$$

in cui V_a e V_d sono rispettivamente i valori di velocità ascendente e discendente relativi al bersaglio, θ_{asce} e θ_{desce} gli angoli di incidenza nelle due geometrie e V_v e V_E le incognite da esplicitare.

Si noti che, in generale, la condizione che le due geometrie di acquisizione identifichino a terra esattamente lo stesso PS non è quasi mai verificata: per procedere alla scomposizione del moto descritta è quindi necessario sottocampionare i PS su una griglia geografica regolare. L'area di interesse viene suddivisa in celle quadrate di 50 m di lato a ciascuna delle quali viene assegnata la media dei valori di velocità dei PS che ricadono nella cella. Questa operazione viene applicata ad entrambi i dataset ascendente e discendente così da consentire la scomposizione del moto su una griglia comune di 'pseudo-PS' (cfr Figura 36)

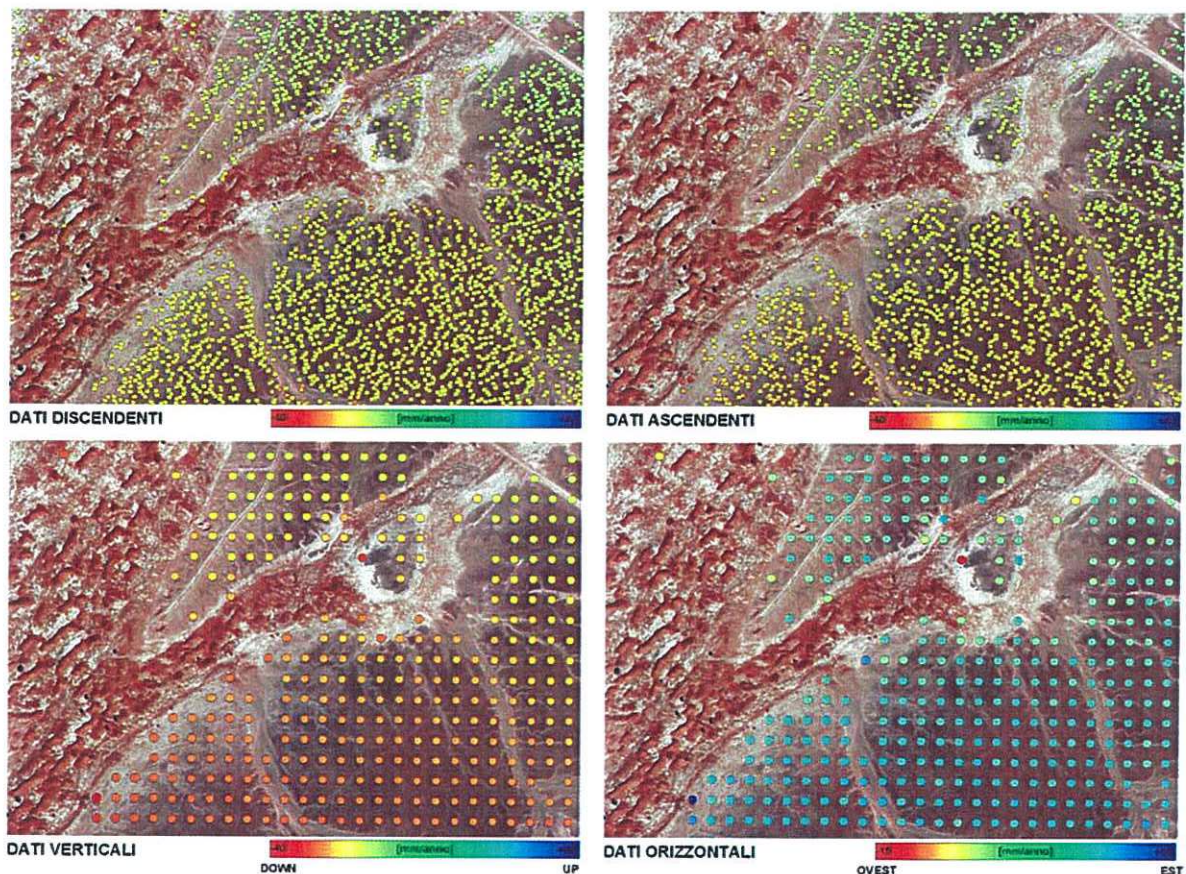


Figura 36: esempio di scomposizione del moto su griglia regolare

Concludendo, la disponibilità di dati sia ascendenti che discendenti per una determinata area offre due vantaggi fondamentali:

- il numero di informazioni riguardanti le dinamiche superficiali aumenta considerevolmente, poiché utilizzando due geometrie è possibile illuminare anche quei bersagli che non sono visibili da una sola prospettiva;
- il campo di velocità può essere scomposto lungo la direzione verticale e orizzontale E-W

In Figura 37 è riportato un esempio relativo al vulcano Etna. La scomposizione del campo velocità consente all'utente di visualizzare il fenomeno deformativo in maniera più intuitiva, mettendo in risalto le zone in cui una componente del moto prevale sull'altra.

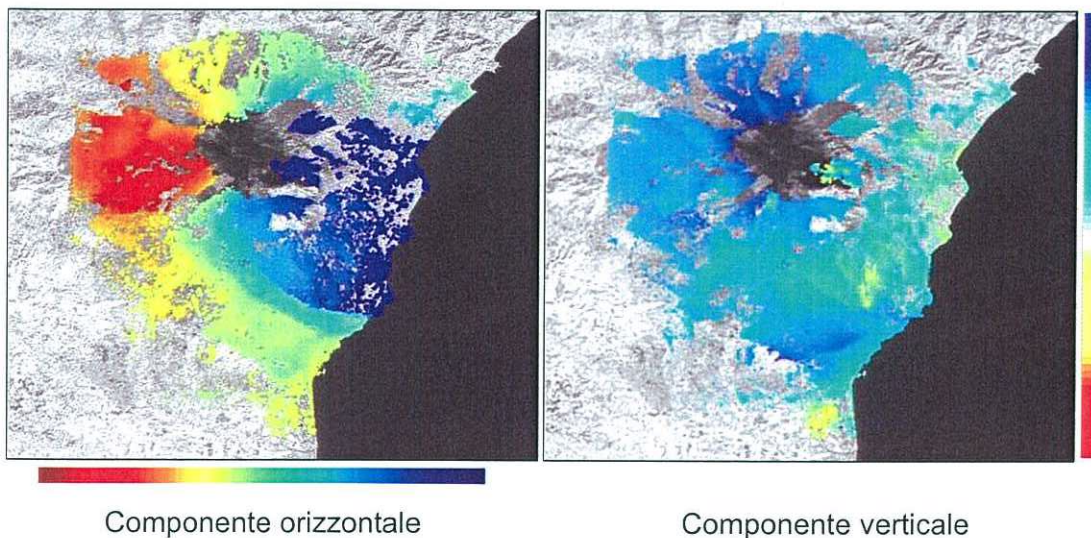


Figura 37: esempio di scomposizione del moto. Velocità orizzontale (W-E) e verticale del Vulcano Etna.

3.2.3 Proiezione delle velocità dei PS nella direzione di massima pendenza

Come precedentemente illustrato, la velocità dei PS è la componente del moto effettivo del punto lungo la direzione che congiunge sensore e bersaglio. A seconda del caso in studio può essere utile calcolare, a partire dalla velocità del PS, la componente di moto lungo la direzione di massima pendenza del versante in analisi. Questa operazione è attuabile unicamente sotto la rigida ipotesi secondo cui il moto sia dovuto ad uno scivolamento diretto nella direzione di massima pendenza del terreno su cui è posizionato il PS.

Partendo da questa ipotesi, utilizzando gli angoli di esposizione e pendenza del versante su cui giace il PS in analisi (si veda Figura 38), è possibile calcolare la componente di velocità del PS sulla direzione di massima pendenza.

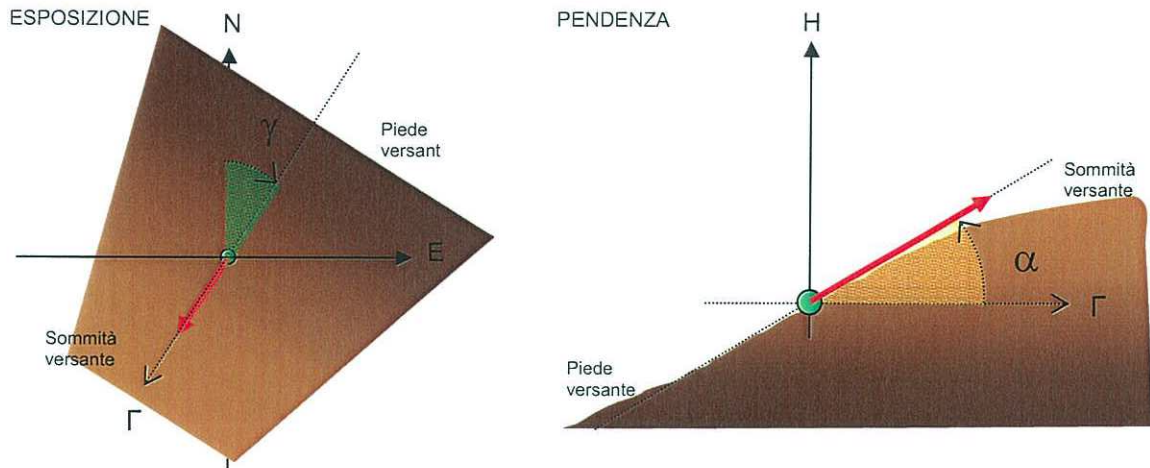


Figura 38: Definizione degli angoli di esposizione (γ) e di pendenza (α) di un versante

3.3 Misure relative

Le misure di spostamento fornite dall'analisi PSInSAR™ sono differenziali nello spazio e nel tempo, nel senso che sono riferite spazialmente ad un punto preso come riferimento (REF) e temporalmente alla data della prima acquisizione satellitare disponibile.

3.3.1 Punto di riferimento REF

In analogia con le reti geodetiche, l'insieme dei PS presenti in un territorio può essere considerato come una fitta rete naturale di punti di misura, le cui posizioni e spostamenti sono riferiti ad un punto di emanazione assunto come riferimento stabile nel tempo. In fase di elaborazione il moto del punto di riferimento è posto per convenzione uguale a zero, senza conoscere informazioni a priori sulle dinamiche in atto nel territorio in esame.

Successivamente alla fase di elaborazione (cioè, in fase di post-processing) può risultare opportuno spostare il punto di riferimento, soprattutto nel caso in cui all'interno della zona considerata siano presenti punti di cui è nota l'entità del movimento, come ad esempio stazioni GPS. Dal momento che le misure di spostamento ottenute dall'analisi PSInSAR™ sono differenziali, è sufficiente scalare i moti di tutti i punti che ricadono nella zona investigata di una quantità pari agli spostamenti subiti dal punto scelto come nuovo riferimento. Questo cambio di riferimento non inficia l'informazione deducibile dal campo di velocità dei PS; dato che a tutti i PS viene sommato il medesimo contributo di moto relativo al nuovo riferimento, l'entità dello spostamento differenziale registrato tra due punti prima e dopo il cambio del punto di riferimento rimane inalterata come nell'esempio di Figura 39.

Si sottolinea che, mentre la verifica della effettiva stabilità del punto di riferimento di una rete geodetica, tradizionale o GPS, richiede tempi lunghi di osservazione, generalmente anni, l'analisi PSInSAR™, coprendo un intervallo temporale pluriennale ed in genere un'area ben

più vasta rispetto a quella controllabile con una singola rete geodetica, offre possibilità di verifica immediate.



Figura 39: cambio di reference point. Nelle due immagini sono illustrate le velocità dei singoli PS utilizzando due punti di riferimento differenti. Da notare come indipendentemente dal punto scelto come riferimento, le differenze relative di velocità tra PS non cambiano.

3.3.2 Processo di georeferenziazione

In termini generali, la georeferenziazione è una procedura che permette di assegnare le coordinate standard (secondo una data proiezione) ai punti di una immagine, utilizzando dei punti di controllo (Ground Control Point o GCP) di una carta topografica o di una immagine già georeferenziata. Viene effettuata applicando una deformazione all'immagine (trasformazione conforme, affine, etc.) che ha lo scopo di riportare i punti di controllo al posto giusto, cioè di adattare l'immagine originaria alle coordinate geografiche/cartografiche attribuitegli con i GCP e di restituire agli oggetti le dimensioni reali in scala.

In origine ciascun *Permanent Scatterers* appartiene ad una singola cella di campionamento propria del sistema SAR definita da due valori di coordinate dette range ed azimuth. Grazie al processo di georeferenziazione, cioè al collegamento al sistema di coordinate assunto come riferimento per la rappresentazione dell'area di studio, l'insieme dei PS acquista un reale significato cartografico.

L'operazione di georeferenziazione consta di due passaggi:

- Passaggio da coordinate nel sistema SAR a coordinate geografiche nel GCS WGS84
- Allineamento dei PS sul supporto cartografico disponibile mediante traslazione rigida

I risultati dell'analisi PSInSAR™ sono visualizzati solitamente su supporti cartografici forniti dal committente (carte tecniche regionali, ortofoto digitali, immagini satellitari ottiche), che



sono generalmente inquadrati in sistemi di coordinate e *datum*² diversi dal sistema WGS84, al quale sono riferiti i dati PS una volta effettuata la necessaria trasformazione da coordinate SAR a geografiche. Per tale ragione è solitamente necessaria la conversione delle posizioni dei PS da WGS84 ad altri sistemi di riferimento; tali trasformazioni vengono solitamente effettuate utilizzando librerie commerciali o routine implementate all'interno dei GIS. I risultati delle trasformazioni sono generalmente affetti da errori sistematici che possono essere di entità da metrica a decametrica, in relazione all'algoritmo di trasformazione utilizzato. Nella pratica l'errore sistematico viene eliminato in fase di allineamento finale sul supporto cartografico utilizzato come base di rappresentazione dei risultati applicando una traslazione rigida rispetto ad un GCP individuato sul supporto cartografico stesso e verificando la distribuzione dei PS rispetto a quella dei manufatti presenti sul territorio (edifici, infrastrutture di comunicazione, linee elettriche, ecc.). La qualità del risultato finale dipende dalla scala e dalla qualità della base cartografica fornita dal committente; l'esperienza finora acquisita ha mostrato tuttavia che l'errore di georeferenziazione risulta in genere contenuto in alcuni metri (si veda per approfondimenti la sezione 4).

Ne consegue che, se si visualizza il dato PSInSAR™ su un layer cartografico differente da quello fornito a TRE in fase di esecuzione dello studio, può accadere che la distribuzione dei PS non sia perfettamente allineata rispetto al supporto alternativo utilizzato. Questo è dovuto alle inevitabili discrepanze esistenti tra cartografie o immagini ottiche restituite in sistemi di riferimento diversi o talvolta a deformazioni presenti all'interno di uno stesso elaborato cartografico. In questi casi ci si trova in presenza di fenomeni come quello illustrato in Figura 40 dove si può notare come i PS, georeferenziati in origine rispetto ad una base cartografica diversa da quella utilizzata per la visualizzazione, risultano traslati in blocco rispetto all'ortofoto su cui sono stati rappresentati. In tal caso l'allineamento deve essere ripetuto utilizzando come riferimento la nuova base cartografica prescelta per la visualizzazione. E' proprio per evitare questo tipo di problemi che viene sempre richiesto al committente di fornire a TRE la base cartografica sulla quale dovranno poi essere rappresentati i risultati dell'analisi PSInSAR™.

3.4 Analisi Multidataset su aree estese

Nel caso di analisi di aree molto estese (ad esempio, un intero territorio regionale) coperte da diversi dataset è consuetudine suddividere l'elaborazione PS in più ritagli (o siti) al fine di limitare il carico computazionale in fase di processing. Ogni sito avrà un suo punto di riferimento e i PS ad esso correlati. In questi casi, a valle del processing, è spesso utile procedere con la "messa in passo" delle velocità dei vari siti per agevolare la visualizzazione complessiva del dato.

Il processo di "messa in passo" consiste in una traslazione rigida delle velocità e nel cambio del punto di riferimento (come spiegato nel paragrafo 3.3.1) e conseguente correzione delle serie storiche dei punti di misura così da rendere visivamente uniforme l'informazione su

² Il *datum* consiste in una superficie ellissoidica orientata di riferimento, esprimibile con semplici formule analitiche. In base al tipo di orientamento si distinguono un datum geocentrico o globale (con centro coincidente con quello di massa della Terra) ed un datum locale (orientato in modo da coincidere localmente con il geode).



scala regionale. Generalmente si sceglie come riferimento un sito che si trova al centro dell'area di interesse e si traslano i moti dei dbf dei vari siti contigui così da ottenere un'informazione spazialmente congruente. Questa procedura comporta però una propagazione dell'errore ben visibile nelle aree di bordo dei siti originari.

Si tenga inoltre sempre presente che le misure di spostamento fornite sono differenziali e si devono sempre intendere relative al punto di riferimento del singolo sito.



Figura 40: Disposizione dei PS non consistente con il layer usato come supporto cartografico.



Figura 41: Disposizione dei PS correttamente georeferenziati sul layer usato come supporto cartografico.



4 Precisione ed Accuratezza

4.1 Definizioni importanti

Il termine precisione, relativamente ad una serie di misure, indica il grado di convergenza dei valori misurati intorno alla loro media, mentre l'accuratezza quantifica la distanza tra le misure e il dato reale (ovvero ciò che si vorrebbe misurare). Facendo un'analogia con una successione di frecce scagliate su un bersaglio, tanto più le frecce sono raggruppate, quanto più la serie di tiri è precisa, mentre più il centro del gruppo di frecce si avvicina al centro del bersaglio, più la serie di tiri è accurata. Da ciò si deduce che una misura potrebbe essere precisa, ma non accurata.

La deviazione standard è un indice che misura il grado di dispersione di una popolazione di dati attorno al valore medio. Questa misura (indicata con σ) 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 valor medio. In assenza di errori sistematici, precisione e accuratezza coincidono.

La misura PSInSAR™, al pari di una misura di spostamento con tecnica geodetica tradizionale o GPS, è tipicamente una misura relativa. È pertanto più appropriato ragionare in termini di precisione piuttosto che di accuratezza.

4.2 Sorgenti di errore

La qualità delle misure PS risulta dipendente da diversi fattori. I principali sono i seguenti:

- Numero di immagini disponibili e loro frequenza: maggiore il numero dei dati, più elevata è la probabilità di identificare punti di misura; più frequenti nel tempo le misure, migliore la stima degli spostamenti differenziali dei PS.
- Problemi di decorrelazione legati all'incertezza dei parametri orbitali dei satelliti e all'eventuale variazione nel tempo delle proprietà elettromagnetiche del bersaglio, come già descritto nel paragrafo 1.8
- Rumore atmosferico: la tecnica PS consente di rimuovere quasi totalmente l'errore legato all'atmosfera; eventuali errori residui possono presentarsi in caso di condizioni atmosferiche non perfettamente simulabili durante il processo.
- Distanza dal punto di riferimento: similmente a quanto succede nelle rete geodetiche tradizionali, la precisione delle misure diminuisce con l'aumentare della distanza dal punto di riferimento ed è espressa dal valore di deviazione standard associato a ciascun PS (cfr. 0)

Il lettore esperto di rilievi GPS differenziali troverà senza dubbio questo elenco simile a quanto avviene in quel campo. Nel dato PS la maggiore densità spaziale delle misure consente una individuazione più semplice e affidabile di eventuali inconsistenze o errori locali, ma la minore frequenza temporale delle misure non permette di adottare alcune tecniche di filtraggio che sono invece comunemente adottate nei dati GPS.



4.3 Precisione delle misure

Le problematiche relative all'accuratezza ed alla precisione dei risultati forniti dalla tecnica PSInSAR™, riguardano tre aspetti distinti:

- la georeferenziazione dei PS
- la determinazione della velocità media di spostamento
- la determinazione delle serie storiche degli spostamenti

I tre aspetti elencati saranno trattati in maggior dettaglio nei paragrafi che seguono. È importante segnalare che i valori di precisione forniti sono da considerarsi validi per punti distanti dal punto di riferimento (qui di seguito indicato "REF") meno di 2 km in caso di dataset composto da almeno 40 immagini.

Un riepilogo dei valori di precisione del dato PS è riportato in Tabella 1.

Posizione in Nord	± 2 m
Posizione in Est	± 7 m
Quota ellissoidica	± 1.5 m
Velocità media di spostamento	± 1 mm/a
Misure differenziali di spostamento	± 5 mm

Tabella 1: Precisione delle misure (1σ) fornite sotto ipotesi di dataset di 40 immagini e distanza dal punto di riferimento inferiore a 2 km.

4.3.1 Errore di georeferenziazione

Come descritto in precedenza l'operazione di georeferenziazione consta di due passaggi:

- Passaggio da coordinate nel sistema SAR a coordinate geografiche nel GCS WGS84
- Allineamento dei PS sul supporto cartografico disponibile mediante traslazione rigida

La procedura complessiva è affetta da due tipi di errori, di seguito descritti, uno variabile per ciascun PS e l'altro comune all'intero set di PS individuati nell'elaborazione.

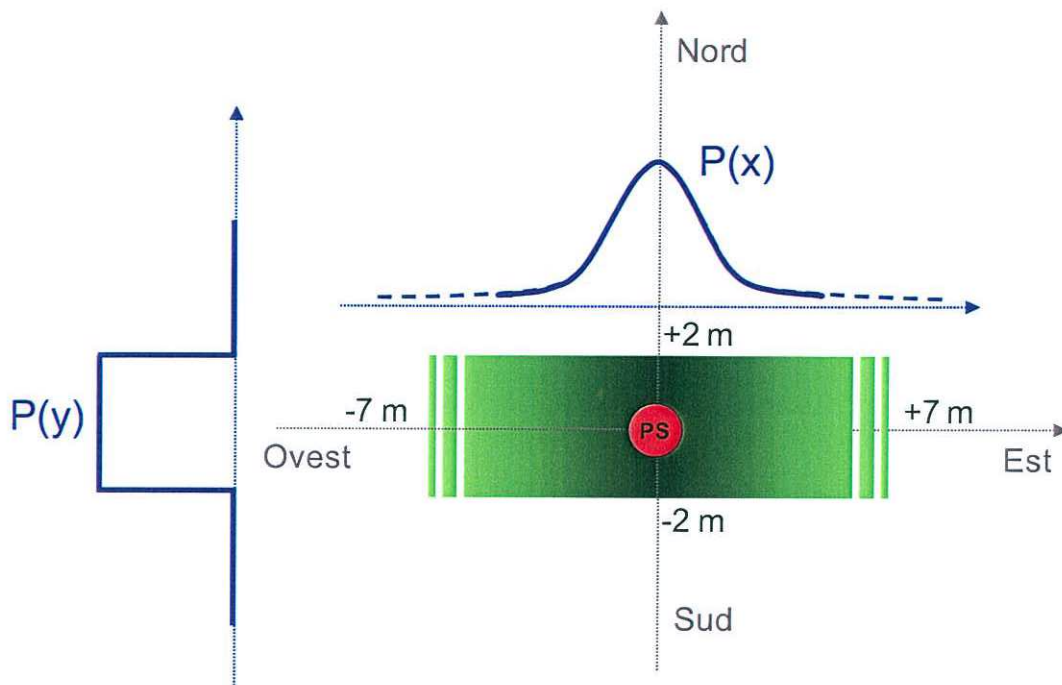


Figura 42: schematizzazione degli errori di posizionamento del PS in geometria SAR..

Per quanto riguarda il passaggio da coordinate SAR a coordinate geografiche, il posizionamento del PS in direzione Nord-Sud risulta affetto da un errore con distribuzione statistica di tipo uniforme compresa tra ± 2 m, mentre in direzione Est-Ovest da un errore con distribuzione statistica di tipo gaussiano a valor medio nullo e deviazione standard pari a ca. 6 m, come illustrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..** In prima istanza, l'incertezza del posizionamento del singolo PS è dunque compresa entro questi limiti.

L'errore di posizionamento in direzione Est-Ovest risulta affetto anche da un errore dipendente dalla distanza dal punto di riferimento, in quanto per punti lontani dal REF peggiora la stima del valore di quota del singolo PS, elemento necessario per poter condurre correttamente la trasformazione. Osservando la distribuzione spaziale della deviazione standard della stima delle quote, questo disturbo risulta correlato nello spazio, ovvero PS vicini tra loro ma entrambi lontani dal REF, subiscono lo stesso tipo di errore.

L'errore associato all'operazione di allineamento infine dipende dalle caratteristiche del supporto utilizzato, pertanto è sempre consigliabile l'utilizzo di ortofoto digitali o di carte tecniche almeno in scala 1:10000 per ottenere buoni risultati. Pur non essendo possibile descrivere statisticamente l'errore residuo, dipendente anche da un fattore umano in quanto è l'operatore che definisce la traslazione da imporre, si può affermare che esso risulta dell'ordine di pochi metri qualora il riferimento cartografico sia di buona risoluzione e siano



ben visibili gli elementi tipici corrispondenti ai *Permanent Scatterers*, ovvero edifici, rocce esposte, infrastrutture lineari, antenne o altri manufatti.

A fronte della procedura di georeferenziazione sopra descritta, la precisione complessiva sulla posizione dei PS può essere considerata (sempre per data-set di almeno 40 dati) pari rispettivamente a $\pm 2\div 5$ m nella componente Est-Ovest ed a $\pm 5\div 6$ m nella componente Nord-Sud.

4.3.2 Errore sulle velocità medie e sulle serie storiche

Come specificato in precedenza le principali cause che concorrono a degradare la stima degli spostamenti dei PS sono il disturbo atmosferico e il rumore di decorrelazione. La presenza di questi due disturbi introduce un errore nella misura della velocità dei PS, tanto minore quanto maggiore è il numero di acquisizioni a disposizione. In considerazione della variabilità di queste sorgenti di errore non è possibile calcolare una legge generale di propagazione dell'errore e pertanto per ogni PS vengono forniti i parametri di qualità (coerenza e deviazione standard) che consentono di valutarne la distribuzione caso per caso.

L'errore sulla velocità media annua di ciascun PS è espresso dalla deviazione standard ad esso associato (cfr.0); tale valore è funzione della distanza dal punto di riferimento. Se si considerano due PS vicini tra loro la loro velocità relativa avrà invece una deviazione standard contenuta, tipicamente inferiore a 1 mm/anno ed indipendente dalla distanza dal punto di riferimento .

Per quanto riguarda la precisione delle serie storiche degli spostamenti, sulla base dell'esperienza finora acquisita si può ritenere che la precisione (1 sigma) del singolo valore della serie storica sia compresa tra ± 5 mm.

4.4 Ambiguità della misura

È importante infine ricordare che, nel caso di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida (ad esempio, un fenomeno di subsidenza particolarmente veloce), si può presentare il problema dell'equivocazione di fase che può complicare l'interpretazione dei risultati come in tutti i sistemi di tipo coerente. La tecnica interferometrica SAR consente infatti di valutare con precisione millimetrica variazioni di distanza sensore-bersaglio pari ad una frazione della lunghezza d'onda (i satelliti ERS e RADARSAT lavorano con lunghezza d'onda pari a 5.66 cm), ma eventuali "salti" di diversi centimetri vengono "equivocati" ovvero non è possibile "contare" il numero intero di lunghezze d'onda. Al limite, se il bersaglio si muovesse esattamente di mezza lunghezza d'onda (2.8 cm per i satelliti ERS) non risulterebbe possibile rilevare alcuna variazione di fase rispetto al caso di bersaglio fermo. Il passaggio dei satelliti (*revisiting time*) pari a 35/24 giorni impedisce inoltre di osservare situazioni di pericolo che richiedono un monitoraggio in tempo reale.

Per meglio comprendere in cosa consiste il fenomeno di equivocazione del moto si osservi la Figura 43. In questo caso, il solido grigio rappresenta un bersaglio del sistema radar di acquisizione.



Il bersaglio è rappresentato in uno stato iniziale T_0 (in blu), mentre in rosso sono rappresentati tre possibili casi A, B e C di spostamento di diversa entità (S_a , S_b e S_c) all'istante T_1 successivo. Il grafico sinusoidale rappresenta la fase dell'onda elettromagnetica incidente sul bersaglio. In figura L rappresenta la distanza che l'onda deve percorrere affinché la sua fase ritorni al valore iniziale.

Nel caso A all'istante T_1 l'oggetto si è spostato di una quantità ΔR inferiore a L. Il sistema radar è in grado di rilevare senza ambiguità questo spostamento S_a misurando il valore della fase dell'onda all'istante T_1 .

Supponiamo invece che all'istante T_1 (caso B) l'oggetto compia un percorso $S_b = L + \Delta R$. Il valore della fase dell'onda rende conto anche in questo caso dello spostamento ΔR ma, osservando il valore della fase all'istante T_1 , non è in nessun modo possibile risalire al fatto che l'onda ha già compiuto un ciclo completo. In definitiva, il sistema di acquisizione misura uno spostamento pari a ΔR , mentre lo spostamento reale è $L + \Delta R$.

Nel caso C si ha una situazione analoga al caso B, ma adesso la fase dell'onda compie un numero intero n di cicli di fase, prima di compiere la variazione corrispondente a ΔR . Benché lo spostamento effettivo dell'oggetto sia $S_c = nL + \Delta R$, per il sensore radar l'oggetto si è mosso solamente di ΔR . Anche in questo caso si è caduti in una situazione di equivocazione del moto.

Dunque, i casi A, B e C sono del tutto equivalenti per il sistema di acquisizione, che misura in tutte e tre le situazioni uno spostamento dell'oggetto di ΔR .

In conclusione, affinché non si commettano errori nella valutazione dello spostamento dell'oggetto, è necessario che tra i due istanti di osservazione l'oggetto non subisca spostamenti superiori a L. Per essere più precisi, per essere sicuri di misurare correttamente non solo lo spostamento ma anche il verso del moto (cioè, l'oggetto si è avvicinato o allontanato di una quantità ΔR ?), è necessario che l'oggetto non si sposti più di $L/2$.

Applicando questa considerazione geometrica al caso specifico dei satelliti ERS, ENVISAT e RADARSAT (lunghezza d'onda λ di 5.6 cm) la distanza L dell'esempio di Figura 43 è pari a $\lambda/2$, cioè 2.8 cm (il fattore $1/2$ tiene conto del fatto che il segnale percorre per due volte lo stesso cammino, dal sensore al bersaglio e viceversa). Pertanto la distanza massima misurabile tra un'acquisizione e la successiva ($L/2$) sarà pari a $\lambda/4$, ovvero 1.4 cm. Considerando che i sensori ERS e ENVISAT hanno un *revisiting time* di 35 giorni e RADARSAT di 24 giorni, sotto l'ipotesi ideale (cioè, di assenza di rumore) di acquisizioni regolari e di moto del PS perfettamente lineare, è possibile misurare rispettivamente velocità annue massime pari a circa 140 [mm/anno] e 210 [mm/anno].

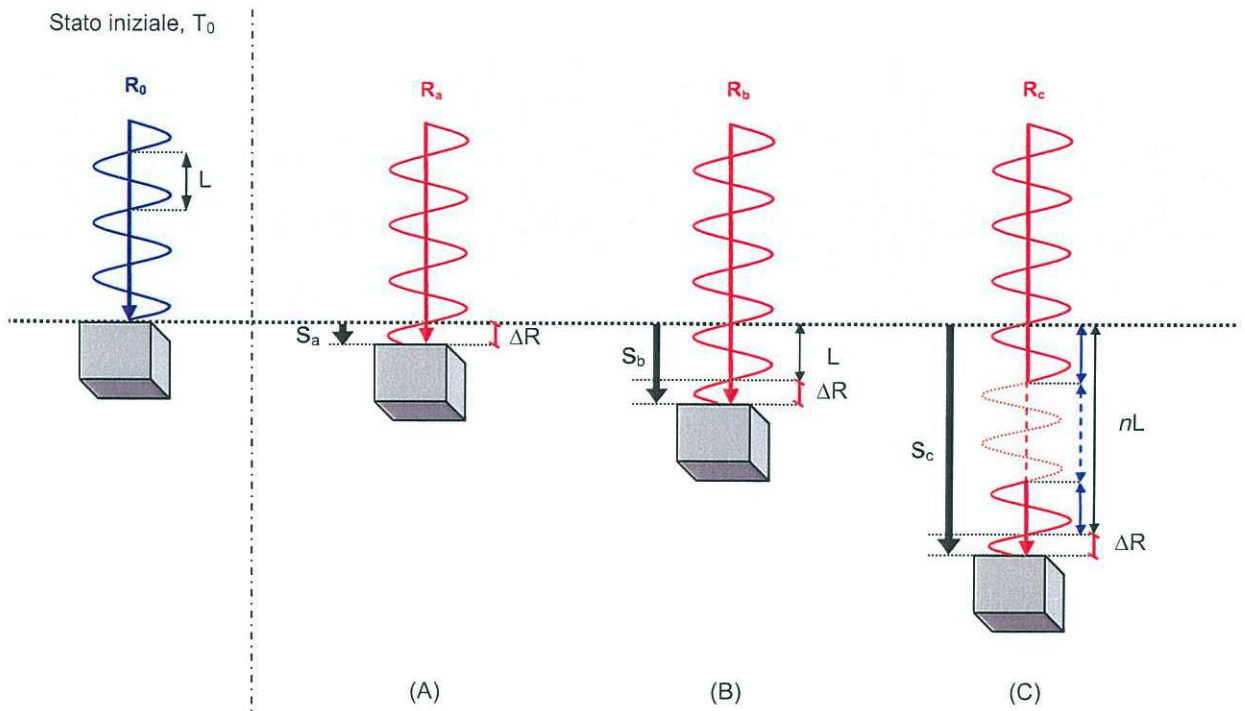


Figura 43: Esempio di equivocazione del moto del PS



5 Vantaggi e limiti della tecnica PSInSAR™

A fronte di quanto esposto in maggior dettaglio nei paragrafi precedenti, si propone nel seguito una sintesi dei principali vantaggi e limiti della tecnica PSInSAR™ applicata allo studio delle deformazioni della superficie terrestre.

Principali punti di forza:

- La tecnica PS consente di superare i problemi dell'interferometria DInSAR. In particolare, per quanto riguarda il disturbo atmosferico, l'approccio PS, sfruttando lunghe serie temporali di immagini radar acquisite su una determinata area, è in grado di stimare e rimuovere il contributo atmosferico da ogni immagine del dataset. Inoltre, come già ricordato in precedenza, i PS possono essere considerati praticamente immuni dagli effetti di decorrelazione.
- Grazie alla tecnica PS, l'interferometria diventa a tutti gli effetti una tecnica applicabile con successo allo studio ed al monitoraggio dei movimenti superficiali, consentendo di apprezzare spostamenti di entità millimetrica su vaste aree quali ad esempio le DGPV (Deformazioni Gravitative Profonde di Versante).
- La tecnica PS consente di misurare movimenti in due dimensioni: verticale ed orizzontale in direzione E-W, grazie alla disponibilità di dati di spostamento in due geometrie (ascendente e discendente).
- Per l'intero territorio italiano sono disponibili due archivi storici: l'archivio ESA-ERS che copre in modo pressoché continuo l'intervallo 1992-2001 e, grazie ad uno specifico accordo tra TRE, il fornitore di dati canadese e il distributore italiano, un archivio di dati RADARSAT-1 a partire da Marzo 2003, nella doppia modalità, ascendente e discendente.
- La complementarietà con l'approccio geomorfologico classico: la disponibilità di informazioni di spostamento su un arco temporale decennale consente di definire il grado di attività dei fenomeni, soprattutto nel caso di fenomeni lenti, che nella maggior parte dei casi non presentano indizi di movimento osservabili sul terreno.

Principali punti di debolezza:

- L'assenza di misure in aree prive di bersagli radar; il problema può essere risolto mediante l'installazione di riflettori artificiali.
- L'impossibilità di stabilire a priori il numero dei PS e la loro distribuzione areale: questa informazione può essere ottenuta solo al completamento dello studio, poiché rappresenta uno dei risultati dell'elaborazione.
- È richiesta l'elaborazione di un numero minimo di 25-30 immagini radar.
- L'ambiguità della misura: trattandosi di una misura interferometrica le differenze tra un'acquisizione e la successiva possono essere calcolate solo come frazione di un ciclo d'onda.



- Il tempo di rivisitazione elevato (35 giorni per i satelliti ERS, 24 per i satelliti RADARSAT): si tratta di una conseguenza di quanto osservato al punto precedente, che limita l'applicabilità della tecnica a movimenti caratterizzati da velocità di spostamento annuo di ordine centimetrico. Decisi miglioramenti tuttavia si avranno con i dati prossime missioni in banda-X, TerraSAR-X e Cosmo SkyMed, con tempi di rivisitazione pari rispettivamente a 11 e 8 gg.
- La mancanza di informazioni di spostamento in direzione N-S

Nel complesso, considerato l'elevato contenuto informativo, la possibilità di ricostruire l'evoluzione pregressa dell'area in esame, l'elevata precisione dei risultati e la complementarità con l'approccio geomorfologico, l'indagine PSInSAR™ rappresenta uno strumento ineguagliabile per studiare movimenti lenti ad ampia scala spaziale e temporale.



6 Sinergia con le tecniche di monitoraggio convenzionali

Rispetto alle convenzionali tecniche di monitoraggio, la tecnica PS offre numerosi vantaggi, tra cui:

- acquisire informazioni su una rete di capisaldi radar estremamente densa, soprattutto nelle aree urbane, dove la densità dei PS può raggiungere valori notevolmente superiori rispetto a quanto ottenibile con le reti geodetiche convenzionali; inoltre, bisogna considerare che i bersagli sono già presenti sul terreno e, a differenza dei tradizionali strumenti di misura (quali, capisaldi geodetici e GPS, estensimetri, inclinometri), essi non richiedono alcuna produzione, installazione e successiva manutenzione da parte dell'operatore;
- ricostruire per ciascun bersaglio radar la serie storica degli spostamenti con una elevata precisione, superiore a quella del GPS in direzione verticale, e con un'alta frequenza temporale in confronto alla livellazione ottica;
- studiare ampie porzioni di territorio oppure zone difficilmente accessibili (dal momento che non richiede alcun intervento a terra), consentendo di ottimizzare i costi ed i tempi di indagine;
- elevata precisione delle misure sia di spostamento che di velocità media annua (fino a 0.5 mm/a);
- elaborare l'archivio storico dell'Agenzia Spaziale Europea (*European Space Agency, ESA*) con la possibilità di indagare l'evoluzione del fenomeno deformativo a partire dal 1992 (data di inizio dell'acquisizione delle immagini radar ERS), la quale può rivelarsi un elemento decisivo, soprattutto laddove le velocità in gioco (mm/a) sono estremamente ridotte e le tecniche convenzionali richiederebbero anni prima di poter dare misure significative.

È opportuno puntualizzare che la tecnica PS non è in competizione con le altre tecniche ma, al contrario, si pone in completa sinergia con esse. L'integrazione dei dati PS con le misure geodetiche tradizionali e GPS permette di sfruttare i vantaggi offerti dalle tecniche citate, aumentando il numero di informazioni disponibili, a favore di una visione più completa dell'evoluzione dei fenomeni studiati. Abbiamo già descritto i punti forza della tecnica PS; descriviamo adesso quelli di livellazione ottica e GPS.

Con la livellazione ottica si può raggiungere un'accuratezza sensibilmente elevata (0.1 mm su linee di livellazione con capisaldi distanti 100 m l'uno dall'altro) e fissare arbitrariamente la posizione dei capisaldi e l'intervallo temporale tra una campagna di rilevamento e la successiva (purtroppo le campagne vengono eseguite raramente con regolarità nel tempo). In virtù della accuratezza raggiungibile e della sua versatilità, questo metodo risulta assolutamente insostituibile per lo studio di fenomeni localizzati ad elevata criticità.

Il GPS, pur mostrando una densità di punti di misura estremamente inferiore a quella dei dati PS ed una accuratezza in verticale (dell'ordine del cm) inferiore sia alla PSInSAR™ sia alla livellazione ottica, è l'unico strumento attualmente in grado di offrire dati tridimensionali e quindi l'orientazione del vettore spostamento nello spazio 3-D. Questa proprietà consente



dunque di fornire indicazioni sul moto anche in direzione N-S, dove i sistemi SAR non possono apprezzare in maniera sensibile il movimento (sezione 3.2.2). Inoltre, possedere informazioni sul moto del terreno a monte dell'elaborazione dei dati SAR, ed in particolare del punto di riferimento (*reference point, REF*) utilizzato nell'analisi PSInSAR™, comporterebbe il grande vantaggio di ottenere velocità assolute e non più differenziali.

La Tabella 2 riassume, a titolo di esempio, alcune delle principali caratteristiche della tecnica PS e di quella GPS.

	PS	GPS
Moto	1-D	3-D
Frequenza di acquisizione del dato	24/35 giorni	giornaliera
Precisione di geocodifica	metri	centimetri
Precisione verticale	millimetri	centimetri
Strumentazione a terra	nessuna	stazione di rilevamento
Densità spaziale delle misure	elevata	bassa

Tabella 2: PS vs GPS

Considerato inoltre il fatto che i sistemi di monitoraggio ed allertamento in tempo reale si basano necessariamente su misure puntuali (estensimetri, inclinometri, piezometri, ecc.), la scelta delle tipologie strumentali più appropriate alle caratteristiche evolutive del fenomeno da controllare è fondamentale per il successo del preannuncio. L'analisi PSInSAR™ rappresenta uno strumento di eccezionale valore a supporto della progettazione di reti di monitoraggio in quanto fornisce informazioni relative sia all'estensione del fenomeno da monitorare sia alla sua dinamica evolutiva.

Quanto esposto evidenzia la complementarità della tecnica PSInSAR™ con le tecniche di monitoraggio tradizionali; un impiego combinato ed una gestione integrata dei risultati nei Sistemi Informativi Territoriali promette quindi notevoli risultati e progressi in materia di studio e gestione del territorio.



Molti casi applicativi possono essere citati a dimostrazione della completa sinergia dei dati PS con quelli ottenuti sia con la livellazione ottica sia con il GPS. Nella sezione successiva vengono riportati alcuni esempi di integrazione (Colesanti et al., 2001), che sono stati condotti per verificare l'attendibilità del dato PS.

6.1 Validazione del dato PS con misure di livellazione ottica e GPS

La validazione tra i dati PS e quelli ottenuti con livellazione ottica e GPS non è un obiettivo facilmente perseguibile, soprattutto a causa della mancanza di procedure standard di validazione, della scarsità di informazioni (geodetiche e geotecniche) *a priori* e di campagne di rilevamento regolari nel tempo.

Affinché i dati siano confrontabili tra loro, essi devono essere proiettati nella stessa direzione, dal momento che i valori ottenuti dall'analisi PSInSAR™ sono misurati lungo la linea di vista del sensore (LOS) e quelli relativi alla livellazione ottica ed al GPS in verticale.

6.1.1 PS vs livellazione ottica

Di seguito è riportato uno studio effettuato presso Ancona (Italia), area notoriamente affetta da un lento fenomeno gravitativo, monitorato con livellazione ottica dal 1983. Le immagini ERS utilizzate per l'analisi PSInSAR™ si riferiscono all'intervallo temporale compreso tra giugno 1992 e novembre 2000. Nell'area d'interesse (3.5 km²) sono stati individuati 650 PS, di cui 12 nella zona in frana.

Le misure di livellazione sono state proiettate lungo la LOS e confrontate con le misure dei PS più vicini. La Figura 44 mostra che i dati sono in buon accordo, anche se si riferiscono solo in parte allo stesso intervallo temporale. Inoltre, si può osservare che, nel periodo di acquisizione delle immagini ERS (1992-2000), la frequenza del dato PS è notevolmente superiore a quella dei dati derivanti dalla livellazione (Colesanti et al., 2001). L'accuratezza delle due tecniche di misura risulta del medesimo ordine di grandezza.

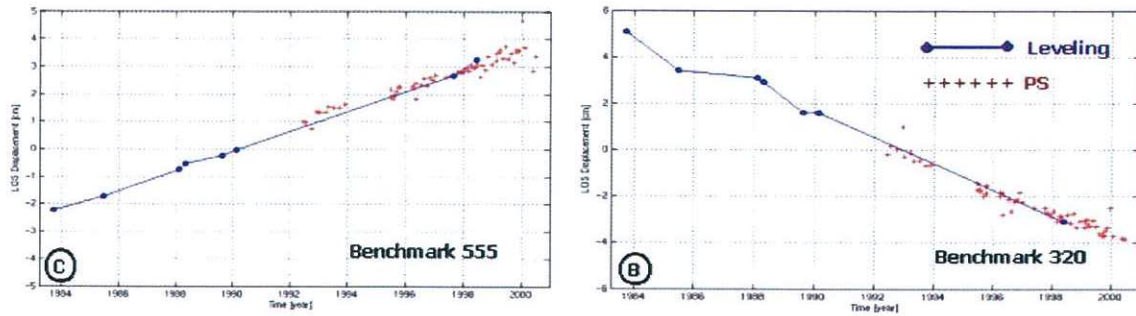


Figura 44: Confronto tra gli spostamenti lungo la LOS registrati in corrispondenza di due capisaldi e quelli dei PS ad essi più vicini.

6.1.2 PS vs GPS

I risultati dell'analisi PSInSAR™ sono stati confrontati con i dati GPS acquisiti dalla rete GPS integrata della California meridionale (SCIGN) ed elaborati presso il JPL (California Institute of Technology). Per il confronto sono state utilizzate le misure GPS raccolte a partire dal 1996 presso 11 stazioni presenti nel bacino di Los Angeles.

Come risulta dalla Figura 45, esiste un ottimo accordo tra i dati GPS, proiettati lungo la LOS, e le serie storiche relative ai PS più vicini (nell'intorno di 100 m). Pur confermando il trend evidenziato dai dati PS, i dati GPS mostrano una minor precisione (peraltro tipica della tecnica di misura).

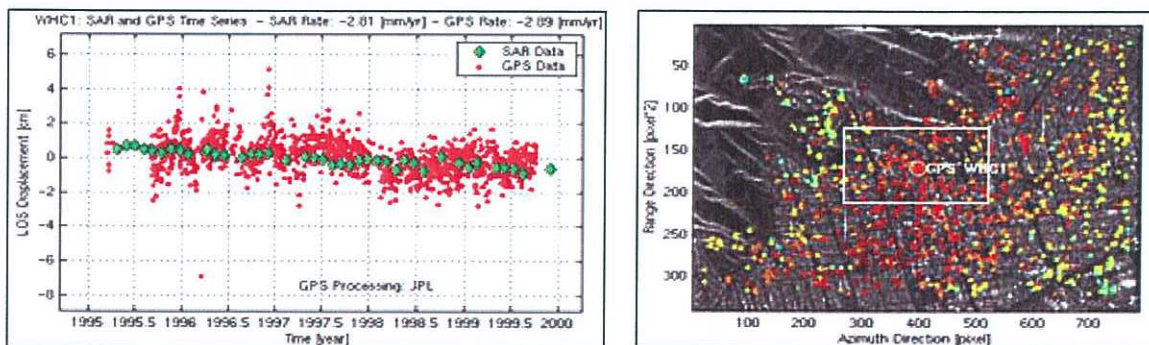


Figura 45: A destra posizione della stazione GPS CLAR e dei PS limitrofi. A sinistra confronto tra gli spostamenti lungo la LOS registrati in corrispondenza del caposaldo GPS e quelli dei PS ad esso più vicini.



7 Formato dei dati

In questa sezione verranno illustrate le principali caratteristiche dei file consegnati al cliente e sarà fornita una descrizione dei loro contenuti, facendo riferimento alle specifiche sezioni per eventuali approfondimenti.

7.1 Struttura del database

I risultati estratti con la tecnica PS sono consegnati al cliente in file digitali (con estensione *.dbf*) che possono essere aperti con il programma Microsoft Excel in modo da visualizzarne il contenuto, senza dover necessariamente importare il file in ambiente GIS (ESRI®).

Per ciascun sito analizzato, le informazioni estratte sono raccolte in tre differenti *database*:

- **REF**: indica le coordinate spaziali del punto di riferimento;
- **MET**: contiene le informazioni geografiche, di velocità e di qualità di ciascun PS;
- **TSR**: contiene le serie storiche di deformazione dei PS.

Il file **REF** riporta le coordinate spaziali (LAT/NORTH, LON/EAST) del punto di riferimento, indicato con il codice REF. Come già spiegato nella sezione 0, i valori di velocità calcolati con la tecnica PS sono differenziali; essi non esprimono quindi grandezze assolute, bensì indicano, come in una rete geodetica convenzionale, le velocità dei PS individuati in relazione ad un punto scelto come riferimento (*reference point, REF*).

CODE	LAT	LON
REF	43,9134506	11,4457217

Figura 46: struttura dei file *REF*

Il file **MET** riporta per ciascun PS, oltre alle informazioni di tipo geografico (LAT, LON) e qualitative (V_STDEV, COHERENCE), il valore della velocità media annua (VEL) stimata nell'intervallo temporale di acquisizione delle immagini processate. Si ricorda che, per convenzione, il segno, positivo o negativo, assegnato al valore di velocità si riferisce a moti rispettivamente in avvicinamento ed in allontanamento dal satellite (per ulteriori chiarimenti si veda la sezione 3.2).

I campi contenuti nel file **MET** possono variare in base alle richieste del cliente; tuttavia, quelli generalmente consegnati sono:

- *Code*: codice che permette di identificare in maniera univoca il punto di misura all'interno del file *.dbf*;
- *Lat/North*: posizione del PS in direzione N-S espressa in coordinate geografiche/cartografiche;
- *Lon/East*: posizione del PS in direzione E-W espressa in coordinate geografiche/cartografiche;



- *Coherence*: parametro di qualità del dato PS, con valori compresi tra 0 e 1 (sezione 0);
- *Height*: quota del PS calcolata rispetto all'ellissoide di riferimento WGS84³;
- *Vel*: velocità media annua di spostamento (mm/a) misurata lungo la linea di vista del sistema (LOS) e stimata sull'intero arco temporale in cui sono state acquisite le immagini; la velocità di ciascun PS è relativa ad un punto di riferimento. (sezione 0);
- *V_stdev*: indice che misura il grado di dispersione attorno al valore di velocità media annua (sezione 0).

CODE	LAT	LON	COHERENCE	VEL	V_STDEV	HEIGHT
A076N	43,6437385	11,1721541	0,81	-1,75	1,17	156,70
A077T	43,6438608	11,1723888	0,77	-2,15	1,18	150,20
A077U	43,6485441	11,2060593	0,79	-1,41	1,09	155,20
A0789	43,6420717	11,1585834	0,68	-1,09	1,25	151,90
A079A	43,6440493	11,1727766	0,89	-2,49	1,14	147,30
A079X	43,6440896	11,1727440	0,73	-0,92	1,19	153,70

Figura 47: struttura file MET

Il file **TSR**, contiene rispetto al file MET per ogni PS una serie di campi aggiuntivi pari al numero di immagini processate. Per ciascun PS, le celle sottostanti ai campi indicati con "Daaaammgg" contengono per quella data acquisizione il valore di spostamento, espresso in mm, stimato rispetto alla prima immagine disponibile (che nel file si diversifica per riportare in ogni cella valori di spostamento uguale a 0.00 mm). Il segno si riferisce, come nel caso della velocità, a movimenti in avvicinamento (positivo) o in allontanamento (negativo) dal satellite. I valori riportati in ciascuna riga, al di sotto dei campi "Daaaammgg", permettono di costruire la serie storica del PS in considerazione.

CODE	LAT	LON	V_STDEV	COHERENCE	VEL	D20030407	D20030501	D20030525
A4XNS	43,9615964	11,0486399	1,29	0,76	0,82	0,00	-1,27	-5,72
A4XBX	43,9598439	11,0502158	1,25	0,92	0,29	0,00	0,76	-0,39
A4RKQ	43,9292916	11,0534296	1,26	0,94	-1,05	0,00	6,41	2,72
A4X18	43,9651565	11,0539591	1,28	0,92	-0,10	0,00	1,51	-0,62
A4XVZ	43,9639921	11,0536339	1,29	0,81	0,87	0,00	-2,95	-1,06
A4R62	43,9361723	11,0539562	1,21	0,94	1,18	0,00	0,04	-2,85

Figura 48: struttura file TSR

³ L'ellissoide di riferimento WGS84 (acronimo di *World Geodetic System 1984*) è un sistema globale geocentrico, costituito da una terna cartesiana con origine coincidente con il centro di massa della Terra, l'asse Z diretto verso il polo N convenzionale al 1984, l'asse X passante per il meridiano di Greenwich al 1984 e l'asse Y diretto in modo da completare una terna destrorsa.



7.2 I parametri di qualità: Coerenza e Deviazione Standard

La tecnica PSInSAR™ prevede l'utilizzo di un modello che tiene conto anche di moti non lineari, stagionali ed eventuali accelerazioni per descrivere gli spostamenti dei bersagli individuati nell'analisi

La coerenza (campo COHERENCE nei file consegnati) è l'indice che misura l'accordo tra i dati ed il modello di spostamento utilizzato in fase di analisi. Può assumere valori compresi tra 0 e 1 dove 0 indica punti che non hanno nessuna attinenza con il modello utilizzato e quindi inaffidabili, mentre valori pari a 1 indicano elevato accordo con il modello utilizzato. In Figura 49 e Figura 50 sono illustrati due esempi rispettivamente di PS non affidabile a bassa coerenza e PS ad alta coerenza. In figura sono riportate anche le repliche delle serie storiche, concetto introdotto nel paragrafo 0.

Il valore di coerenza minima accettabile è stabilito, tramite una simulazione con metodo Montecarlo, in modo che la probabilità di errore sia inferiore a 10^{-5} . Si impone cioè che, statisticamente, il valore di velocità di un solo PS su centomila venga considerato attendibile corrispondendo in realtà a un dato casuale e quindi inaffidabile. Tale valore, utilizzato come soglia di selezione dei *Permanent Scatterers*, risulta essere inversamente proporzionale al numero di immagini utilizzate nell'elaborazione.

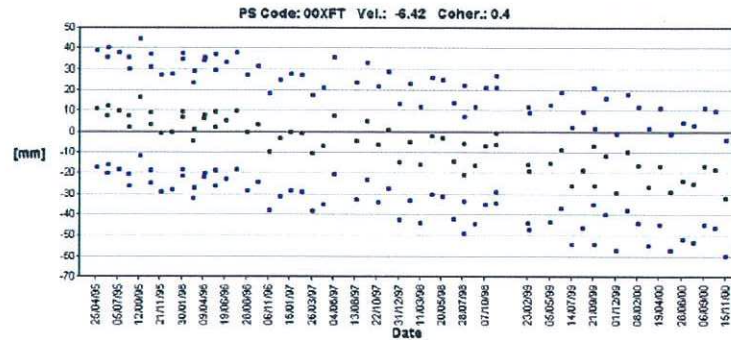


Figura 49: Esempio di serie storica di un PS con coerenza pari a 0,4. In blu sono rappresentate le repliche della serie storica a distanza pari a metà della lunghezza d'onda.

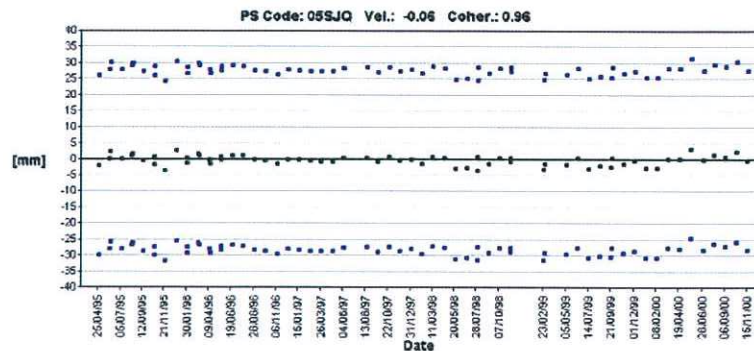


Figura 50: Serie storica di un PS con coerenza pari a 0,96. In blu sono rappresentate le repliche della serie storica a distanza pari a metà della lunghezza d'onda.

Esistono però anche casi in cui bassi valori di coerenza non sono necessariamente dovuti ad una elevata rumorosità del dato, ma bensì al fatto che il tipo di moto analizzato non viene ben approssimato dal modello usato. Un caso in cui si verifica questo fenomeno si ha quando si è in presenza di moti con caratteristiche differenti all'interno dell'arco temporale di analisi, come ad esempio punti di misura che divengono tali solo dopo una certa data o lo sono solamente per tratti del range temporale. (cfr. Figura 51).

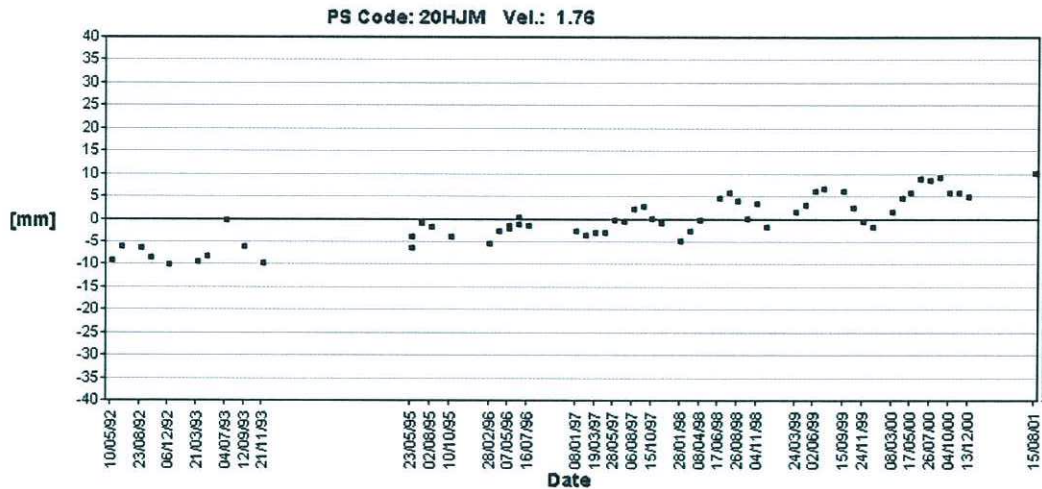


Figura 51: Esempio di serie storica stagionale.

Poiché la velocità di ogni PS è relativa ad un punto preso come riferimento (REF), è fondamentale considerare anche la propagazione dell'incertezza di misura man mano che ci si allontana da esso.

La deviazione standard (campo V_STDEV nei file consegnati) indica di quanto vibra la stima della differenza di velocità del punto in analisi rispetto al riferimento (REF). Tale indice è dunque relativo a una coppia di punti (il PS considerato e il punto di riferimento). Questo significa che due punti vicini (distanti tra loro meno di due chilometri) saranno affetti dallo stesso errore e pertanto la differenza tra le loro velocità non risulterà da esso influenzata. Per capire il significato di questa grandezza riportiamo un semplice esempio. Supponiamo che la velocità media annua per un dato PS sia -3 mm/anno, rispetto ad uno specifico punto di riferimento, e la rispettiva deviazione standard $+0.5$ mm/anno; ciò significa che il valore "vero" della velocità, in assenza di errori sistematici, è compreso tra -2.5 e -3.5 mm/anno con una probabilità del 68% (1 sigma).

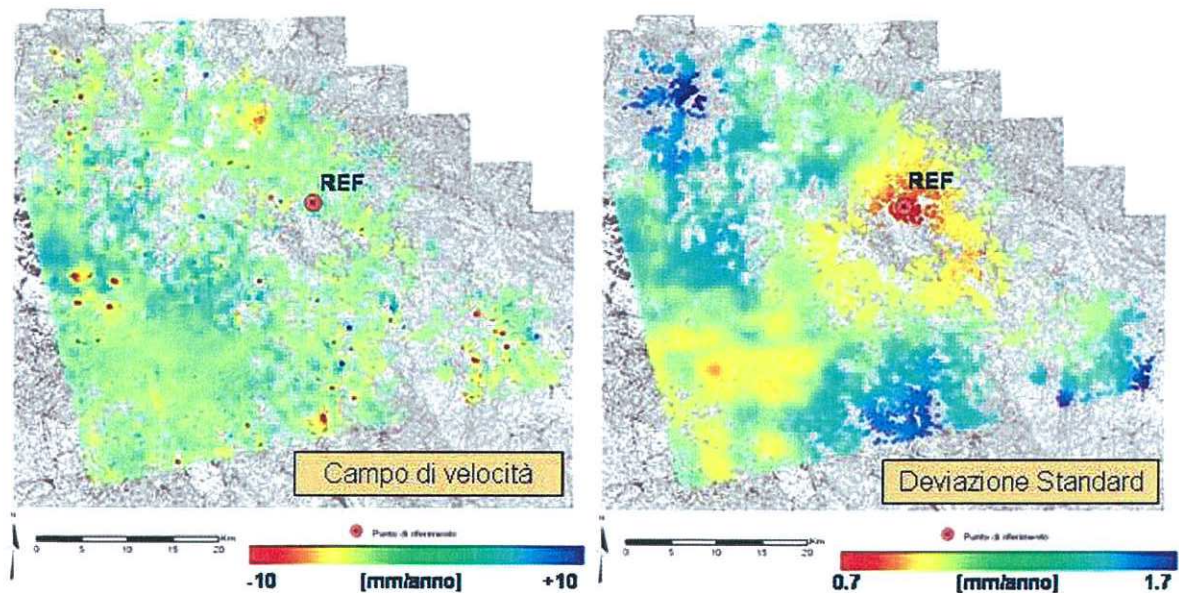


Figura 52: A destra campo di velocità dei PS. A sinistra corrispettiva mappa di deviazione standard delle velocità funzione della posizione del punto di riferimento.

In Figura 52 si può osservare come varia nello spazio la deviazione standard dell'errore che va a degradare la stima di velocità. Anche la topografia, oltre alla distanza dal punto di riferimento, influenza l'andamento di tale valore e come vengono raggiunti i valori massimi (nell'esempio pari a 1.7 mm/anno) proprio in corrispondenza delle cime. Questo significa che rispetto al riferimento localizzato a fondovalle ed indicato con un circolo rosa, la velocità di un PS situato in quota sarà influenzata da un rumore con deviazione standard pari a 1.7 mm/anno e che lo stesso punto confrontato con un altro PS localizzato nelle vicinanze non risentirà di questo effetto.

Nel caso in cui si proceda ad un cambio del punto di riferimento in fase di post-processing, il valore di deviazione standard riferito al punto di riferimento originale non è più valido. È comunque possibile calcolare il valore corretto delle deviazioni standard riferite al nuovo punto di riferimento tenendo conto della dipendenza dalla distanza e dalla topografia dell'area in esame.

8 Guida pratica

Nella presente sezione verranno fornite le linee guida per visualizzare i risultati PS in ambiente GIS (ESRI®) sia utilizzando le normali procedure native dell'applicativo geografico sia utilizzando uno strumento (*Client Toolbar*) appositamente sviluppato da TRE per velocizzare le operazioni.

8.1 Visualizzare i PS nei sistemi informativi territoriali

I file in formato “.dbf” come tutti i database geografici sono facilmente consultabili e utilizzabili nei più comuni sistemi informativi territoriali. Convertibili anche in formato “shape file”, questi file si importano solitamente come griglia di punti a cui si associa un codice colore in funzione dell'informazione che si vuole visualizzare. Di seguito si riporta un esempio di import e visualizzazione del dato PS in ambiente GIS (ESRI®).

Come primo passo si procede con il caricamento del layer PS mediante il pulsante di “Add Data” selezionando il file “.dbf” di interesse (Figura 53).

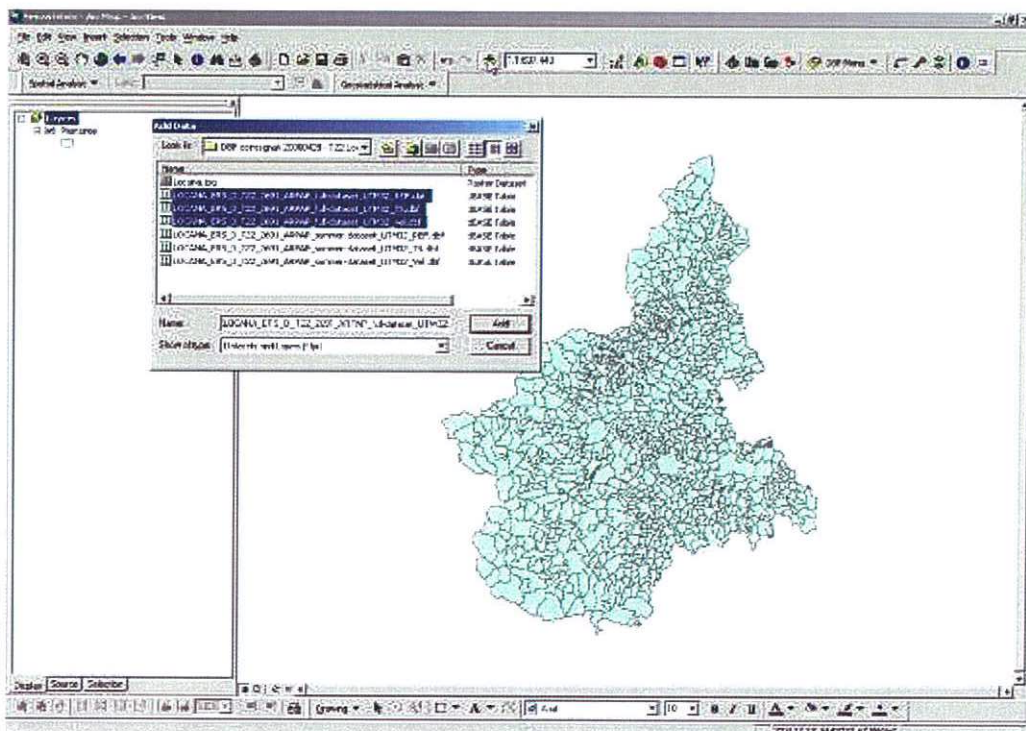


Figura 53: Esempio di caricamento di un dbf in ambiente GIS (Arcmap 8.x o 9)

Per poter visualizzare correttamente i PS, occorre specificare i campi X, Y ed il sistema di coordinate da utilizzare. Questa operazione viene effettuata cliccando con il tasto destro sulla tabella appena caricata presente nella Table of Contents e selezionando la funzione "Display XY Data". Specificare: X=LON (o EAST) e Y= LAT (o NORTH) nella finestra di dialogo e tramite il tasto "Edit" impostare il sistema di coordinate proprio del file ".dbf" (Figura 54).

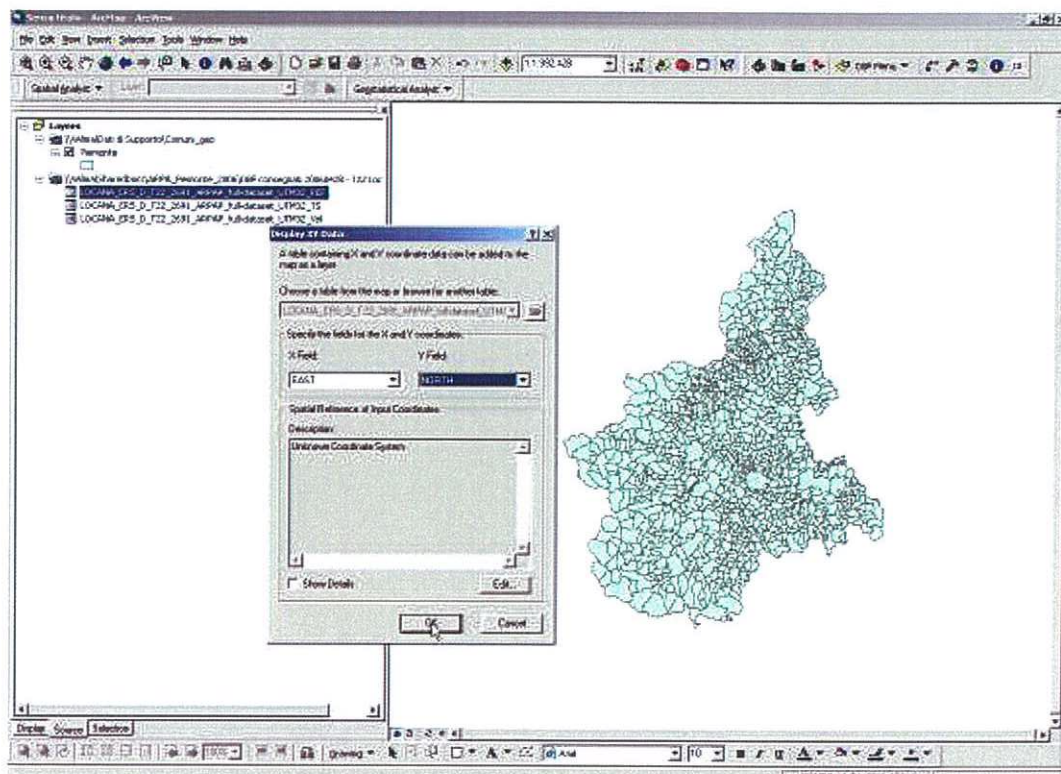


Figura 54: Selezione dei campi LAT e LON come riferimento geografico

I punti così caricati vengono visualizzati nelle loro posizioni ma senza nessuna informazione di velocità associata. Per visualizzare le velocità è necessario selezionare dalla finestra "Symbology", presente tra le Proprietà del layer, la modalità di visualizzazione "Quantities-Graduated Colors" e impostare come campo "Value" la velocità PS.

A questo punto va selezionata una scala cromatica e tramite il tasto "Classify" è possibile ridefinire le classi (bin) della scala colori. Si consiglia di usare come scala cromatica la "Spectrum – Full Bright" con tonalità dal rosso al blu passando per il verde e di definire i bin con dimensioni uniformi (es. passo 0,5 mm/anno) saturando le velocità in funzione della variabilità dei valori presenti (es ± 5 mm/anno). In Figura 55 è riportata l'interfaccia per la selezione della scala colori con le impostazioni standard consigliate.

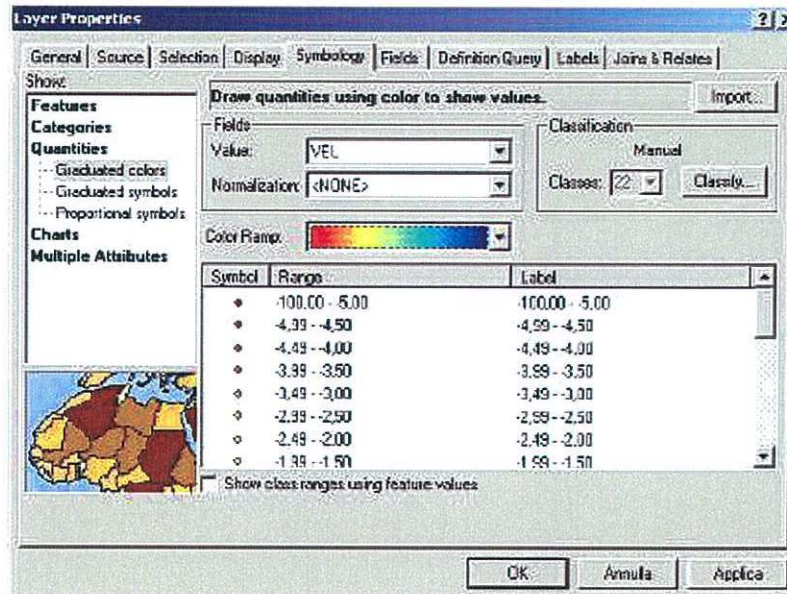


Figura 55: Interfaccia per la selezione della scala colori.

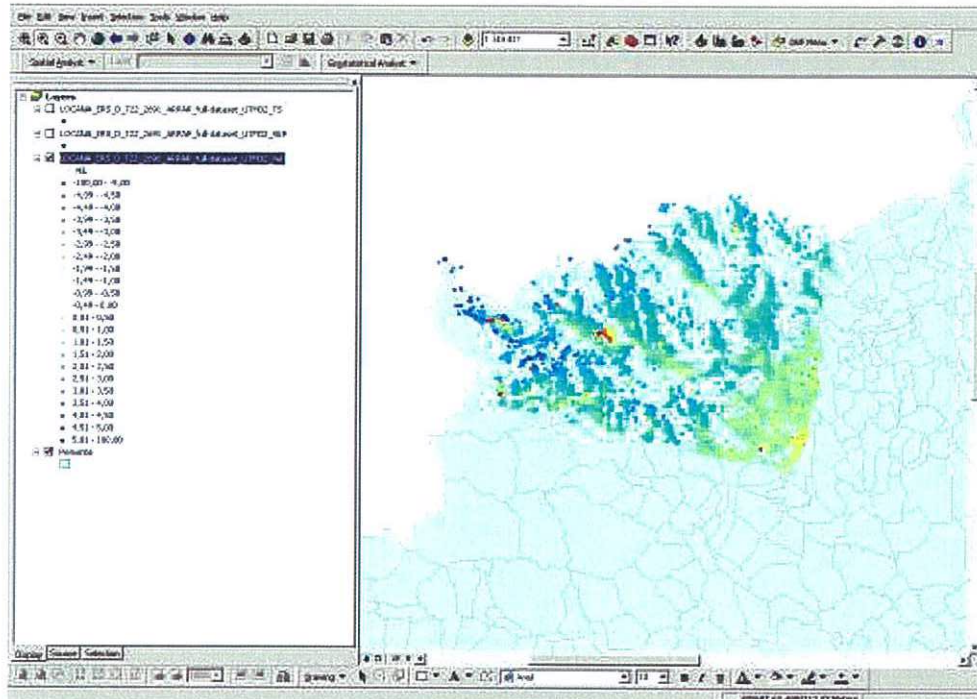


Figura 56: Velocità dei PS individuati.

A seconda del dato in uso risulta importante una scelta oculata degli estremi della scala colori, in modo da visualizzare le caratteristiche di moto dell'area in modo appropriato. Alcuni suggerimenti sull'uso di una scala colori adatta al risultato in osservazione sono contenuti nel paragrafo 8.3.

Visualizzate così le velocità dei PS è possibile studiare più nel dettaglio le deformazioni dei singoli punti consultando le serie storiche di spostamento, per i punti per cui sono fornite.

Per farlo è sufficiente selezionare il PS di interesse tramite lo strumento "Select Features", aprire con il tasto destro l' "Attribute Table" del layer dbf selezionato e scegliere tra le opzioni "Create Graph"

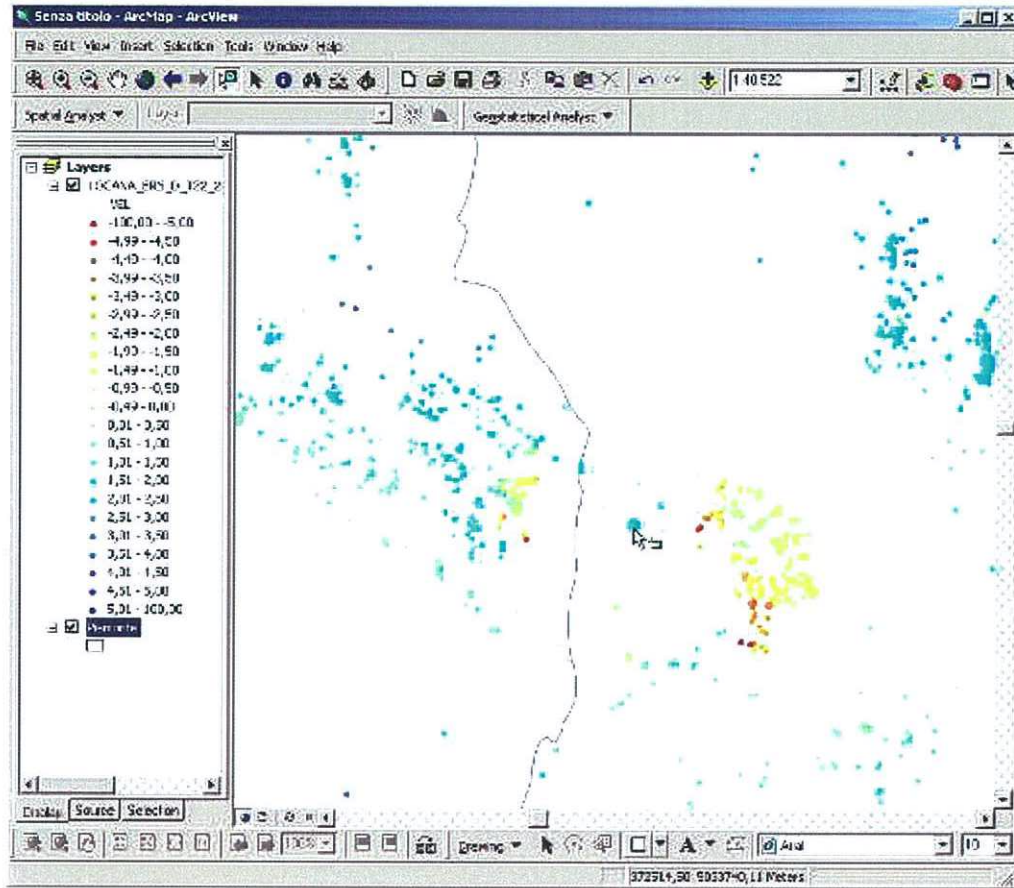


Figura 57: Uso del tool "Select Feature"

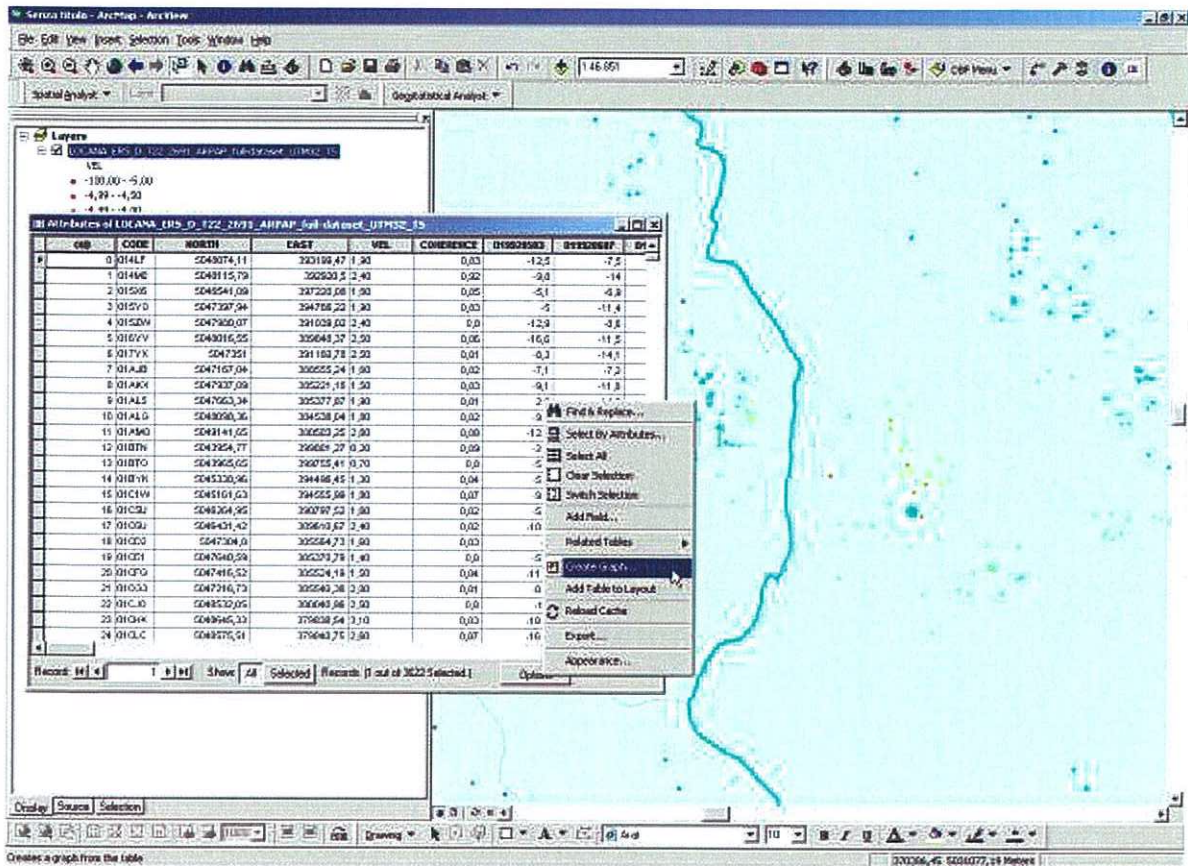


Figura 58: Opzione "Create Graph" per la visualizzazione di serie storiche.

Sceglie la tipologia di grafico "Line" si selezionano nell' "Y axis field" tutti gli spostamenti corrispondenti alle varie date di acquisizione mentre per l'asse X si seleziona l'opzione "Graph data series using" "Fields". In Figura 59 è riportato il risultato dell'operazione.

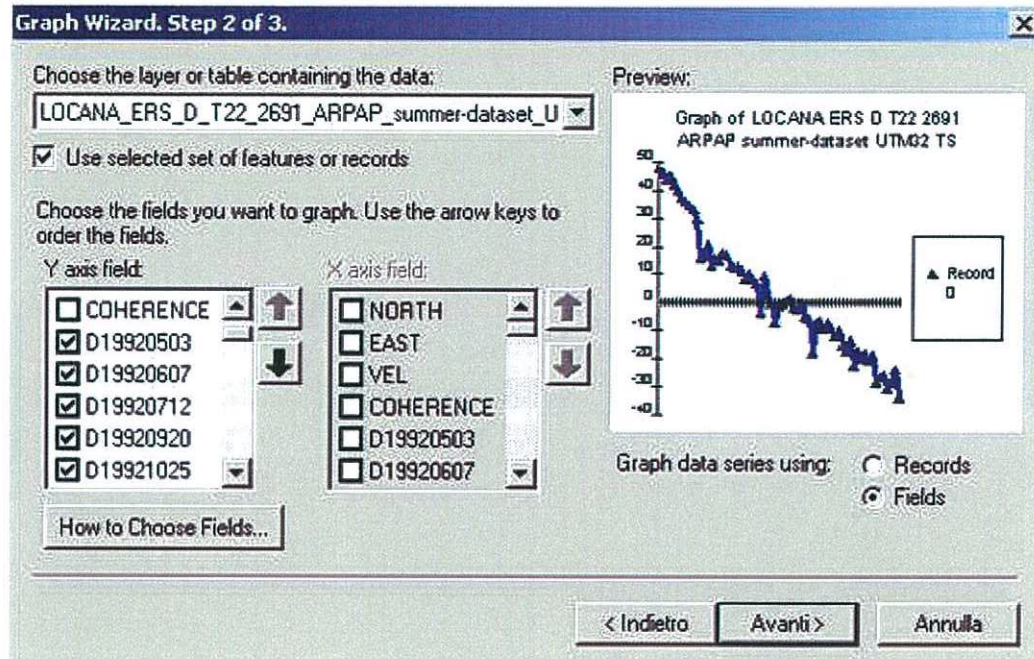


Figura 59: Visualizzazione di una serie storica

8.2 Utilizzo della Client Toolbar

TRE ha sviluppato e mantiene aggiornato uno strumento che mette il cliente in condizione di dedicarsi interamente alla sua attività di interpretazione dei risultati PS, senza dover spendere gran parte del tempo ad importare e visualizzare le informazioni contenute nei file consegnati da T.R.E..

Si tratta di un plug-in per ambiente GIS (ESRI®) grazie al quale è possibile disporre di una apposita toolbar (Figura 60) in ambiente ArcGIS (ArcMAP 9.x) che consente la rapida rappresentazione e consultazione dei file contenenti i risultati dell'analisi PS.



Figura 60: *Client Toolbar*; da sinistra a destra i pulsanti che consentono di aprire il file dbf, visualizzare una sintesi del suo contenuto, visualizzare le serie storiche contenute nel file TSR e selezionare la scala cromatica più adatta al caso in esame.

La *Client Toolbar* consente di:

1. aprire ed importare un file *.dbf* in ambiente GIS (ESRI®);

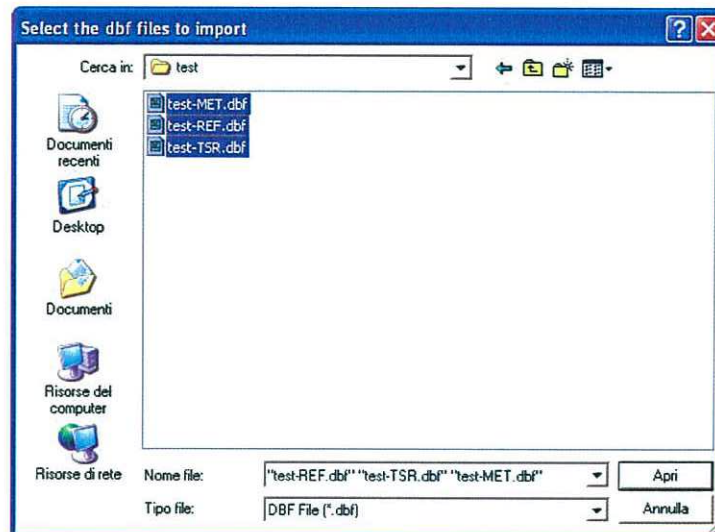


Figura 61: *Client Toolbar* – import di un file dbf

2. visualizzare le informazioni relative al file selezionato (numero di campi riportati nel file e numero di PS) ed alle immagini elaborate (numero di immagini processate, prima ed ultima acquisizione);

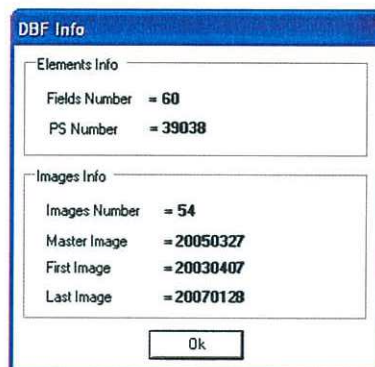


Figura 62: *Client Toolbar* – visualizzazione sintetica del contenuto di un file dbf

3. visualizzare le serie storiche dei PS contenuti nel file TSR;

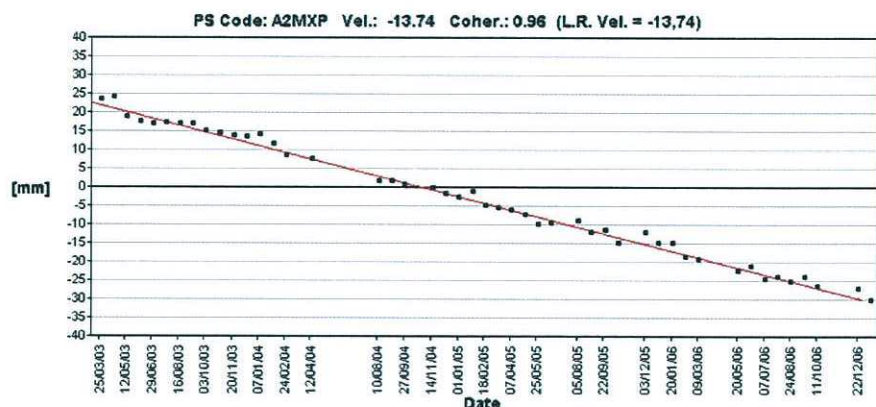


Figura 63: *Client Toolbar* – visualizzazione della serie storica di un PS

4. selezionare la scala cromatica per la variabile VEL del file selezionato.

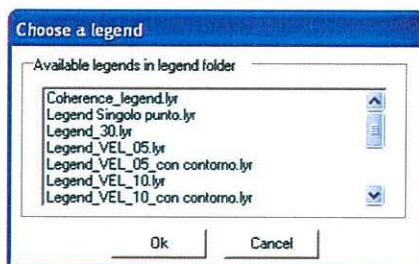


Figura 64: *Client Toolbar* – selezione della scala cromatica per la rappresentazione della VEL

Nel seguito vengono chiariti alcuni aspetti relativi all'impostazione della scala cromatica per la visualizzazione delle velocità PS ed alla visualizzazione ed interpretazione delle serie storiche degli spostamenti.

8.3 Visualizzazione delle velocità e impostazione della scala cromatica

Una volta caricati con il primo pulsante (da sinistra a destra) della *Client Toolbar*, i PS compaiono come punti dello stesso colore. Per visualizzare la velocità associata a ciascuno di essi, tenendo selezionato il relativo layer (MET o TSR), l'ultimo pulsante (da sinistra a destra) della *Client Toolbar* consente di scegliere il range di variazione desiderato. Si tratta di una scala con colori graduati, centrata sul valore zero di velocità e con un elevato numero di classi con ampiezza regolare in modo da cogliere anche le minime sfumature di variazione del parametro visualizzato. La scala di colori proposta è quella denominata *Spectrum-Full*

Bright, con tonalità che passano gradualmente dal rosso, al verde ed al blu, con classi di dimensioni uniformi e velocità saturate in funzione della variabilità dei valori presenti (Figura 65). Naturalmente, la scelta dei valori estremi della scala dipende dall'entità dei valori minimo e massimo della velocità, come si dirà nel seguito.

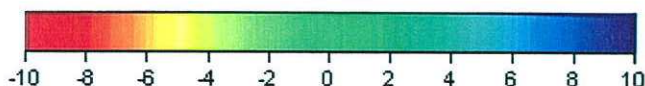


Figura 65: esempio di scala colori convenzionalmente adottata per rappresentare la velocità di spostamento annua, con intervallo di variazione compreso tra -10 e +10 mm/a. Secondo la convenzione adottata i valori negativi sono da interpretarsi come allontanamento dal satellite mentre i valori positivi significano avvicinamento al satellite

Per una corretta visualizzazione del fenomeno deformativo si deve scegliere il giusto intervallo di variazione, analizzando in primo luogo l'istogramma con la distribuzione dei valori di velocità (facilmente ottenibile in ArcMAP).

Ad esempio, nel caso di velocità di spostamento superiori a 5 mm/anno, utilizzare una scala colori variabile tra -5 e +5 mm/anno non consente di visualizzare né i valori di velocità ≤ -5 mm/anno né quelli $\geq +5$ mm/anno, perché essi risultano concentrati in un'unica classe, rispettivamente, di colore rosso e di colore blu (nell'ipotesi che la scala cromatica utilizzata sia quella denominata *Spectrum-Full Bright*). Questo inconveniente è comunque di facile soluzione: è sufficiente ampliare l'intervallo della scala colori per includere anche i valori superiori (in valore assoluto) agli estremi di variazione della scala precedentemente scelta.

Tuttavia, la scelta degli estremi della scala cromatica deve sottostare a certi criteri; la scala non deve risultare né eccessivamente ampia né eccessivamente ristretta rispetto alla distribuzione dei valori di velocità. Nel primo caso, infatti, tutti i valori di velocità risulterebbero compresi nelle classi centrali e quindi i PS apparirebbero essenzialmente di colore verde, condizione che l'utente potrebbe erroneamente associare ad assenza di moto. Nel secondo caso, se da un lato diminuire l'ampiezza della scala colori consente di rilevare i moti indotti dal fenomeno deformativo nelle sue minime sfumature, dall'altro bisogna considerare che non si può scendere al di sotto del limite di risoluzione del sistema (che in generale è dell'ordine dei decimi di mm; a tale proposito si veda la sezione 4).

In Figura 66 la stessa area è rappresentata con scale colori differenti. L'immagine di destra mostra come l'uso di una scala più ampia (con valori tra -20 e +20 mm/anno) permetta di evidenziare le dinamiche più rilevanti (si può infatti notare che ci sono tre aree in movimento), smorzando le variazioni di ordine inferiore. Nell'immagine di sinistra, invece, la scelta di una scala con estremi pari a 10 mm/anno (in valore assoluto) permette di rilevare le variazioni del moto con maggiore dettaglio.

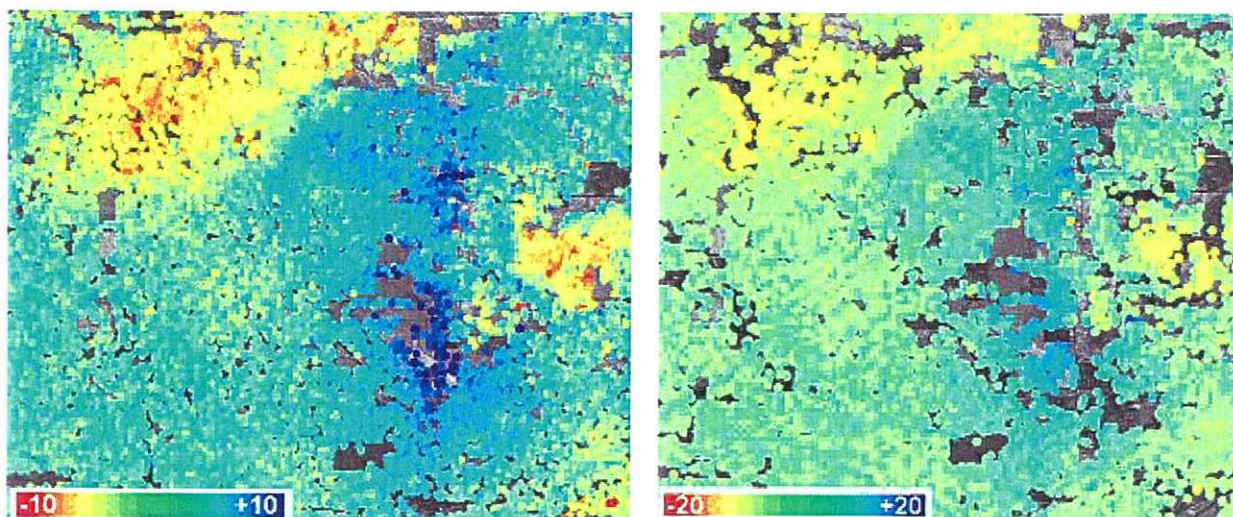


Figura 66: Visualizzazione del campo di velocità tramite l'utilizzo di scale cromatiche con estremi di variazione in valore assoluto pari a 20 mm/anno (a destra) ed a 10 mm/anno (a sinistra) all'interno della stessa area geografica.

8.4 Consultazione delle serie storiche

Le serie storiche riportano, per ogni PS, gli spostamenti in millimetri del bersaglio lungo la LOS in funzione del tempo trascorso dalla prima acquisizione della serie, che viene utilizzata come riferimento.

L'analisi di dettaglio di questi spostamenti permette di ricavare informazioni approfondite circa il comportamento del singolo PS non direttamente deducibili di parametri riportati nei risultati consegnati. Infatti tramite l'analisi delle serie storiche si possono analizzare in dettaglio gli andamenti dei moti stagionali o di tipo non lineare e valutare, ad esempio, quando il moto è divenuto accelerato.

In Figura 67 si riportano degli esempi di serie storica in cui è si evidenziano un andamento stagionale (A), non lineare (B)..

I diagrammi delle serie storiche si ottengono utilizzando l'apposito pulsante della *Client Toolbar*, come precedentemente indicato.

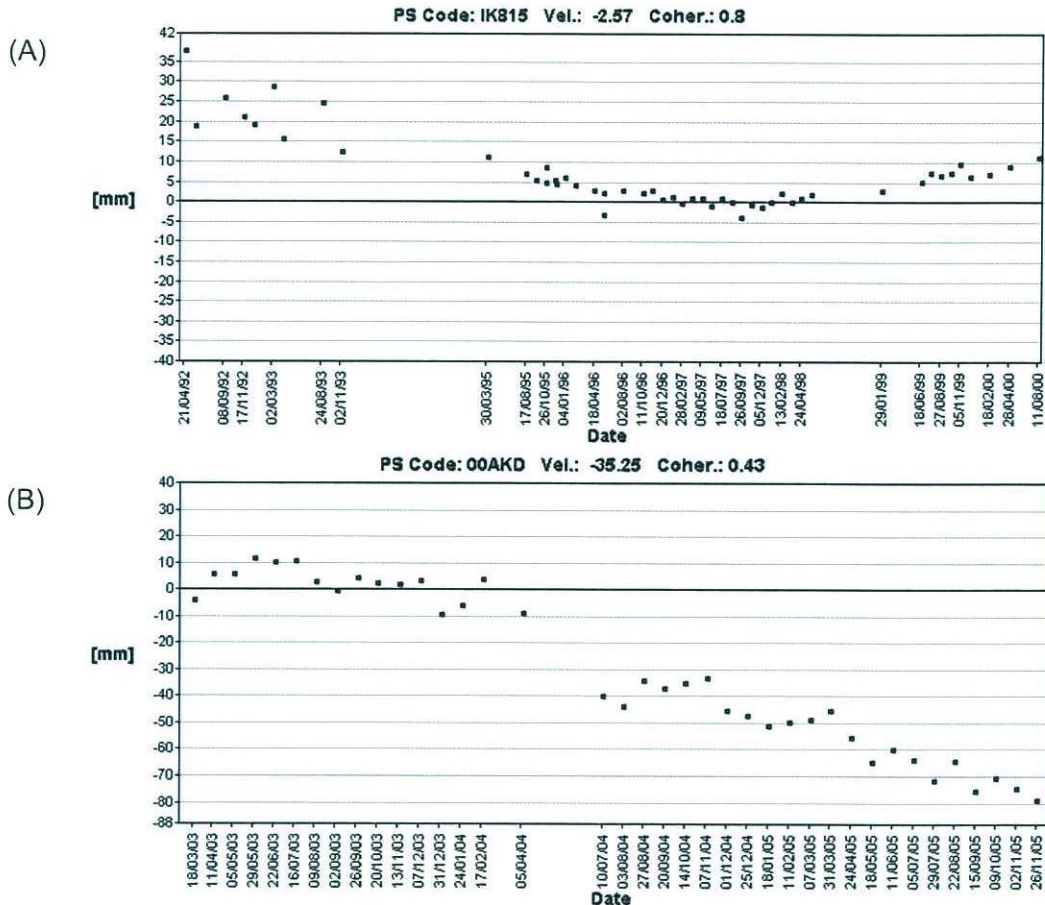


Figura 67: Esempi di serie storiche: (A) non lineare, (B) accelerato

Si osservi inoltre che lo studio delle serie storiche consente di individuare casi in cui il punto in analisi si comporta da PS solo in un sottoinsieme dell'arco temporale di osservazione. In questo caso il valore di coerenza risulta basso, in quanto essa misura l'affidabilità dei punti di misura lungo tutto l'arco temporale di analisi.

Particolare attenzione va dedicata al fenomeno noto come ambiguità di fase o "phase unwrapping". Come spiegato nel paragrafo 4.4 la Tecnica PSInSAR™ è basata su misurazioni di variazioni di fase dell'onda incidente tra due acquisizioni successive. In un sistema coerente non è possibile distinguere tra uno spostamento ΔR e uno spostamento $nL + \Delta R$ (con L lunghezza d'onda del sistema), incorrendo nell'errore di equivocazione del moto. Questa situazione può creare problemi in presenza di movimenti molto veloci e con un succedersi delle acquisizioni molto irregolare. Un esempio di quello che si può ottenere è riportato in Figura 68: a seguito della mancanza di dati nel 1994, non è possibile distinguere quale delle tre serie storiche rappresentate corrisponda a quella corretta, in quanto tutte e tre

le soluzioni sono plausibili. Questo problema di ambiguità di fase è proprio di tutti i sistemi coerenti, dove l'informazione è contenuta nella fase di un'onda elettromagnetica.

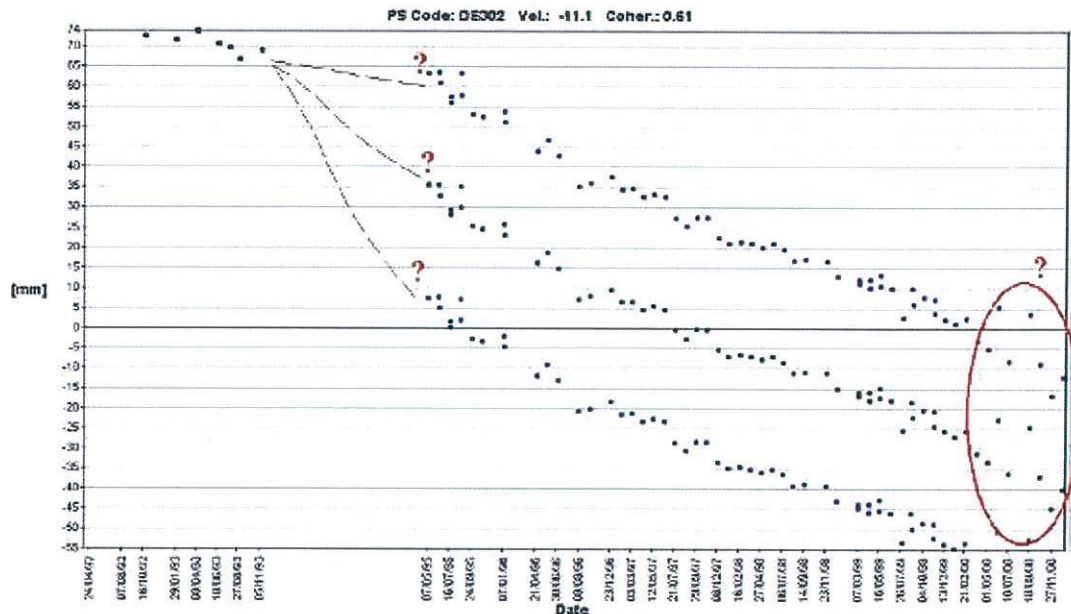


Figura 68: Esempio di *phase unwrapping*

Per riconoscere fenomeni di questo tipo è fondamentale, durante la visualizzazione delle serie storiche, rappresentare graficamente anche le repliche della serie stessa a distanza di $\pm 0.5L$ in modo da poter valutare graficamente se ci siano andamenti più logici rispetto a quelli individuati dall'analisi. Tali considerazioni richiedono comunque grande attenzione ed esperienza e dovrebbero servire innanzitutto per individuare i PS per i quali il modello utilizzato dall'analisi non è sufficiente piuttosto che per fare ipotesi e per ricostruire serie storiche di moti che vanno oltre i limiti fisici del sistema (come indicato nel paragrafo 5). In Figura 69 è riportato un esempio in cui si può notare come la serie storica originale, rappresentata in nero, presenti un errore di phase unwrapping nel passaggio indicato dalla freccia blu. Rappresentando anche le due repliche a $\pm 0.5L$ (in rosso) si nota come utilizzando la replica a $-0.5L$ si ottenga un andamento più verosimile. In questo caso l'errore di phase unwrapping è dovuto alla forte non linearità del PS analizzato, si può infatti notare una accelerazione a partire dal 18 Gennaio 2005.

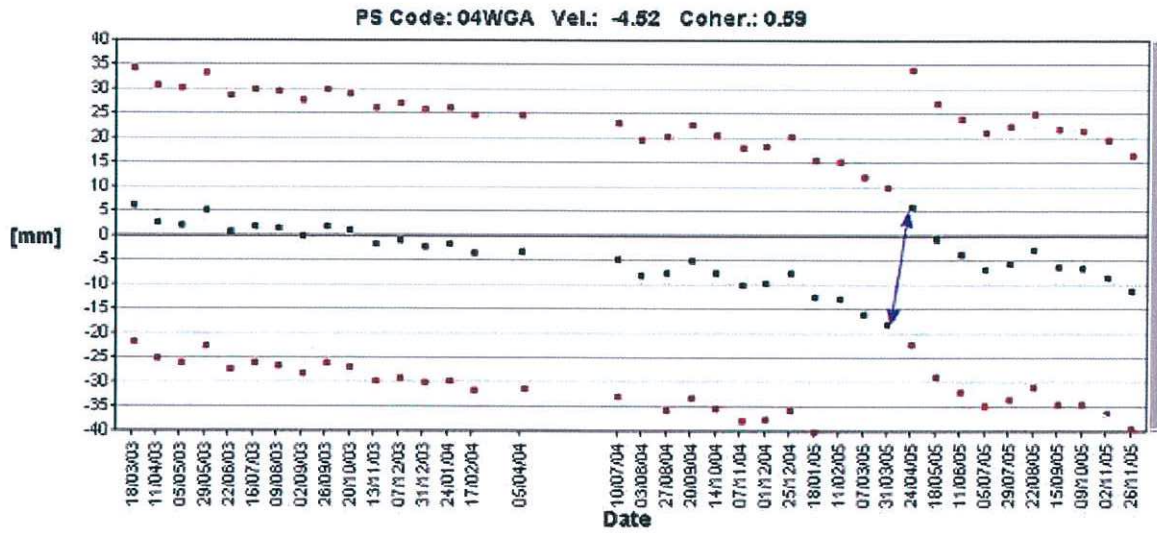


Figura 69: serie storica con errore di phase unwrapping.



9 Applicazioni

L'approccio PSInSAR™ offre al cliente un consistente numero di applicazioni in molti campi scientifici (tra cui geologia applicata, geologia strutturale, geofisica, vulcanologia, ingegneria civile, ingegneria mineraria). Questa tecnica presenta vantaggi superiori alle convenzionali tecniche di rilevamento grazie alla capacità di monitorare vaste aree in tempi ristretti e a costi relativamente contenuti, alla precisione delle misure, all'elevata densità spaziale delle misure ed alla possibilità di accedere ad un archivio storico di dati per lo studio di fenomeni passati (sezione 6).

Una breve carrellata di esempi ed immagini relative ai vari settori applicativi in cui la tecnica PS può essere utilizzata è già stata mostrata nella sezione 1. In questa sezione i vari casi applicativi verranno indagati separatamente e con maggiore dettaglio, facendo riferimento alle fonti bibliografiche da cui sono state estratte le informazioni riguardanti soprattutto l'interpretazione geologica degli eventi. Il lettore può comunque trovare sul sito www.treuropa.com una vasta galleria di immagini ed attingere agli articoli scientifici specifici.

9.1 Subsidenza

La subsidenza consiste in un progressivo abbassamento della superficie terrestre che può essere innescato da cause sia naturali (compattazione dei sedimenti, movimenti tettonici) sia antropiche (estrazione di fluidi dal sottosuolo, attività mineraria oppure carico esercitato dai manufatti artificiali).

La tecnica PS rappresenta un ottimo strumento per studiare e monitorare con ripetitività ed omogeneità le zone soggette a subsidenza, sia a livello regionale che di singole opere antropiche; si tratta infatti dell'unica metodologia in grado di consentire analisi mensili su centinaia di km². Considerando che le aree in subsidenza in genere sono intensamente urbanizzate, la quantità di dati PS è di gran lunga superiore a quella ottenibile con qualsiasi altra metodologia. L'accuratezza delle misure di velocità in direzione verticale è solitamente superiore rispetto a quella ottenibile con il GPS (si veda la Tabella 2 nella sezione 6) e per tale ragione i dati PS ben si prestano allo studio dei fenomeni di subsidenza. In ogni caso, il dato satellitare non sostituisce le indagini in sito ma, se opportunamente integrato a dati provenienti da altre fonti, può garantire una più approfondita comprensione del fenomeno indagato (si veda a titolo di esempio la sezione 6). Inoltre, l'esistenza di un archivio storico ERS, ossia di una serie di immagini radar acquisite a partire dal 1992, permette di avviare indagini in grado di ricostruire la dinamica dell'area di interesse in tempi passati.

Lo studio del fenomeno di subsidenza che ha interessato la città di New Orleans rappresenta un caso emblematico. L'applicazione della tecnica PS ha permesso di identificare sul territorio oltre 180.000 punti di misura, dando luogo ad una mappa di subsidenza con una definizione che con i sistemi tradizionali non era possibile ottenere. Il risultato mostra chiaramente come il fenomeno di subsidenza, che pure interessa tutta l'area d'interesse, risulti particolarmente accentuato in corrispondenza di alcuni argini, affetti da velocità superiori ai 20 mm/a (Figura 70). In particolare, questo studio ha potuto mettere in evidenza

come alcune sezioni degli argini che hanno ceduto al passaggio dell'uragano Katrina nell'agosto 2005 (identificati sulla destra della Figura 70 dall'allineamento di PS di colore rosso), già negli anni immediatamente precedenti al disastro fossero affette da spostamenti intensi, superiori ai tassi medi di deformazione misurati in tutta l'area (Dixon et al., 2006). Ciò prova come questa tecnica possa essere un ottimo strumento per pianificare interventi preventivi, soprattutto in aree ad alto rischio idrogeologico.

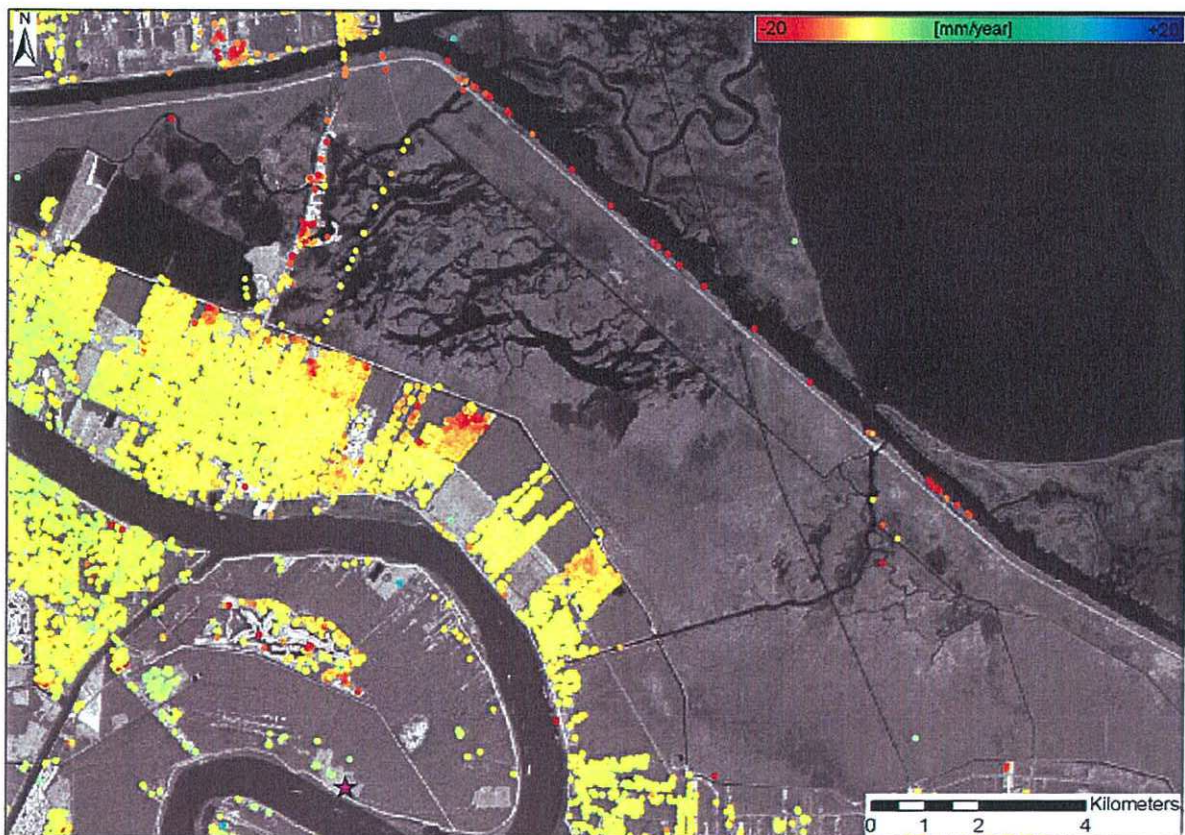


Figura 70: Campo di velocità dei bersagli radar (PS) individuati nell'area del Grande Delta del Fiume Mississippi comprendente la città di New Orleans. I valori di velocità sono saturati tra -20 e +20 mm/a e si riferiscono all'arco temporale 2002-2005.

9.1.1 Estrazione di fluidi dal sottosuolo

Le compagnie che operano nel settore di estrazione del petrolio e di gas naturale sono attualmente tra i maggior fruitori della tecnica PS, la quale viene utilizzata per il monitoraggio delle aree interessate dall'estrazione e per evidenziare eventuali relazioni tra processo di

estrazione e tasso di subsidenza in modo da consentire una migliore pianificazione sia delle attività estrattive che di preservazione delle strutture in superficie.

Un tipico caso di subsidenza indotta dall'estrazione di petrolio dal sottosuolo e dallo sfruttamento intensivo della risorsa idrica sotterranea è quello verificatosi nella regione di Pomona (Los Angeles). In Figura 71 è possibile osservare come le intense attività estrattive abbiano prodotto un notevole abbassamento del terreno (rappresentato dalla superficie in colore rosso); l'area indicata sulla sinistra (in colore blu) è invece dovuta al sollevamento determinato dalla faglia di San Josè (www.treuropa.com).

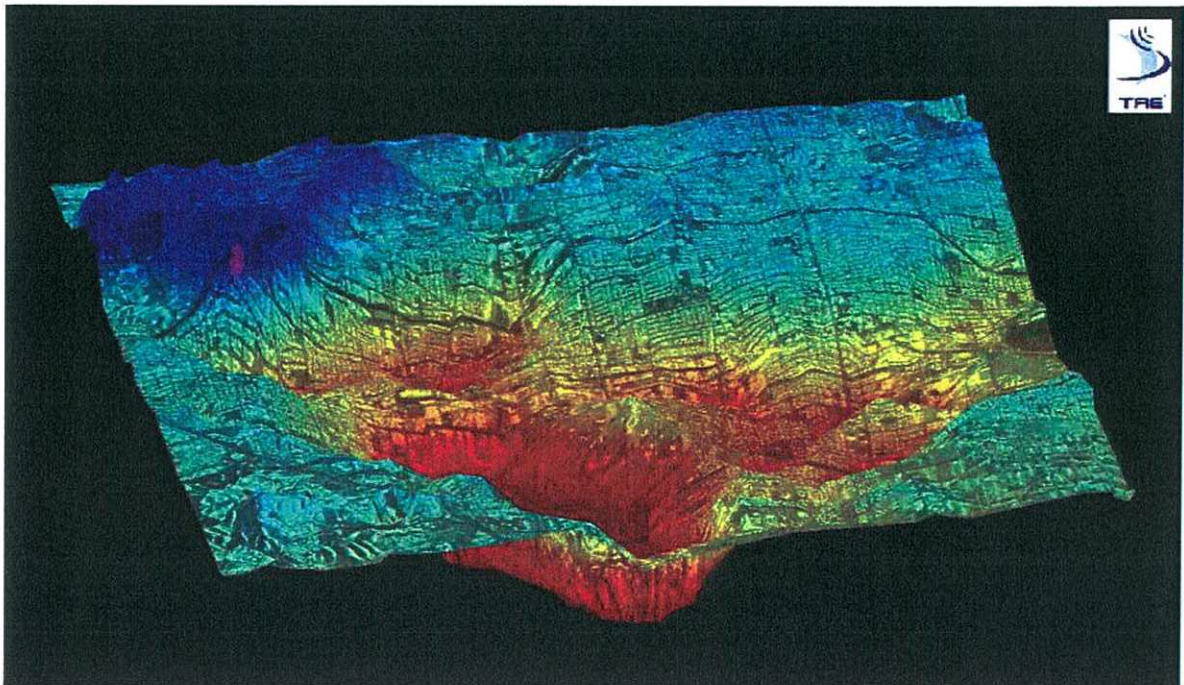


Figura 71: Rappresentazione 3-D della deformazione superficiale avvenuta nei pressi di Pomona (Los Angeles). I valori di spostamento sono compresi tra -20 cm (rosso) e +6 cm (blu) e si riferiscono all'intervallo temporale 1992-1999.

L'emungimento di acqua dal sottosuolo può essere un'altra possibile causa del fenomeno della subsidenza. L'applicazione della tecnica PS rappresenta una metodologia innovativa per indagare con maggiore risoluzione ed accuratezza i movimenti del terreno legati alle dinamiche idrogeologiche. A tal proposito, uno studio effettuato su un'area di estensione pari a 20 km x 20 km nella zona di Las Vegas (Nevada) ha permesso di individuare ben 90.000 PS e di indagare con estremo dettaglio la risposta nel tempo degli acquiferi alle attività di emungimento e di ricarica in riferimento al periodo 1992-2005 (nel 1990 ha avuto inizio un programma di ricarica artificiale che viene effettuato nella stagione invernale ad opera del Las Vegas Valley Water District) (Bell et al., 2007). La porzione di territorio a NW della Faglia

di Eglington è notoriamente soggetta a forte subsidenza; le serie storiche dei PS che si trovano in questa zona hanno evidenziato un rallentamento nella velocità di subsidenza di circa 2 cm/a, passando da più di 3 cm/a (nel periodo 1992-1996) a meno di 1 cm/a (nel periodo 2003-2005) conseguentemente alla risalita della superficie piezometrica (Figura 72).

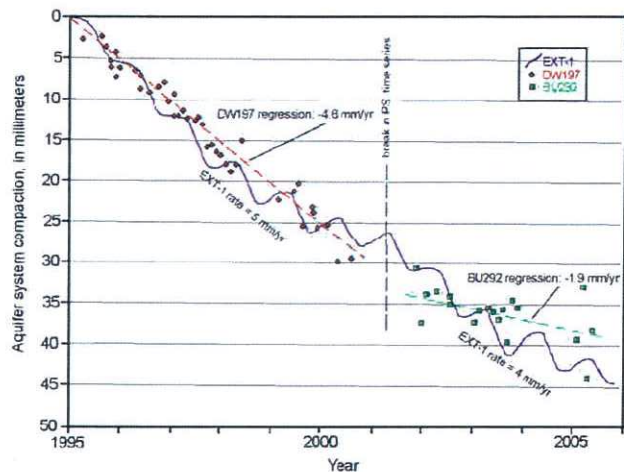


Figura 72: A sinistra l'area di interesse analizzata. A destra la serie storica di un PS sovrapposto all'andamento rilevato da una stazione GPS posta nelle vicinanze del PS considerato.

9.1.2 Attività mineraria

L'estrazione dal sottosuolo di materiali solidi, quali ad esempio carbone, ferro, sale, e la successiva interruzione dell'attività estrattiva può innescare processi dinamici che possono manifestarsi più o meno pesantemente in superficie con conseguenze spesso imprevedibili e soprattutto difficilmente controllabili. Subsidenza e collassi sono generalmente i fenomeni che si verificano più di frequente. Dunque, è di fondamentale importanza monitorare le aree minerarie in modo da prevenire eventuali danni.

Rispetto alle convenzionali tecniche (livellazione ottica e GPS) l'analisi PS è in grado di offrire un monitoraggio regolare nel tempo e su aree molto estese, come quelle minerarie, in tempi ridotti e con costi relativamente bassi.

La tecnica PS è stata applicata su un'area della Lorena (Francia) con estensione superiore a 800 km², individuando ben 60 PS/km² (Colesanti et al., 2005). Lo studio è stato svolto da TRE in collaborazione con BRGM. La città di Roncourt è soggetta da tempo a fenomeni di instabilità dovuti alla presenza di un sito minerario per l'estrazione di materiali ferrosi. L'analisi PSInSAR™ ha permesso di evidenziare movimenti precedenti al febbraio 1999 (data in cui si è verificato l'evento franoso più preoccupante). La possibilità di evidenziare moti precursori rappresenta un enorme vantaggio applicativo soprattutto quando mancano dati provenienti da altre fonti. Questo studio mostra chiaramente l'importante ruolo che riveste la tecnica PS nella pianificazione territoriale e nella valutazione del rischio.



9.1.3 Sinkholes

Un processo per certi versi simile al fenomeno della subsidenza è quello noto in letteratura col nome di *sinkhole*. Questi sprofondamenti sono dovuti alla presenza nel sottosuolo di cavità di origine sia naturale che antropica (cave o ambienti nel sottosuolo ad uso vario, acquedotti, fognature, drenaggi, ecc). In alcuni centri urbani italiani (tra cui Roma e Napoli), i fenomeni di dissesto provocati dal crollo di cavità sotterranee hanno determinato ingenti danni materiali e, in alcuni casi, anche la perdita di vite umane.

Anche la Regione Toscana è soggetta alla formazione di *sinkholes*. Il 14 ottobre 1995, una voragine di circa 40 m di diametro si aprì improvvisamente in una zona residenziale di Camaiore (Lucca), facendo sprofondare una palazzina di tre piani e danneggiando notevolmente altri edifici limitrofi che crollarono nei giorni successivi. Su questa area è stata svolta un'indagine PS, in due intervalli temporali differenti.

L'elaborazione delle immagini acquisite tra il 1992 ed il 2000 mostra chiaramente che l'area d'interesse non è affetta da movimenti apprezzabili ad eccezione di alcuni PS che si sono dimostrati ricadere nella zona interessata dal crollo. Le serie storiche relative agli edifici crollati (grafico in Figura 73) rivelano chiaramente che nessun spostamento si è verificato prima del 1995, anno in cui si iniziano a rilevare i primi movimenti repentini dell'area fino ad evolvere in crollo. Si osservi che l'interruzione della serie storica nel periodo successivo all'ottobre 1995 è dovuta alla perdita di riflettività dei bersagli radar conseguente al crollo degli stessi. Concentrando l'analisi nell'arco temporale stabile, compreso tra il 1992 ed il 1996, è stato possibile mettere in evidenza moti precursori al crollo dimostrando ancora la potenza della tecnica PSInSAR™ nel settore di previsione e prevenzione di eventi calamitosi.

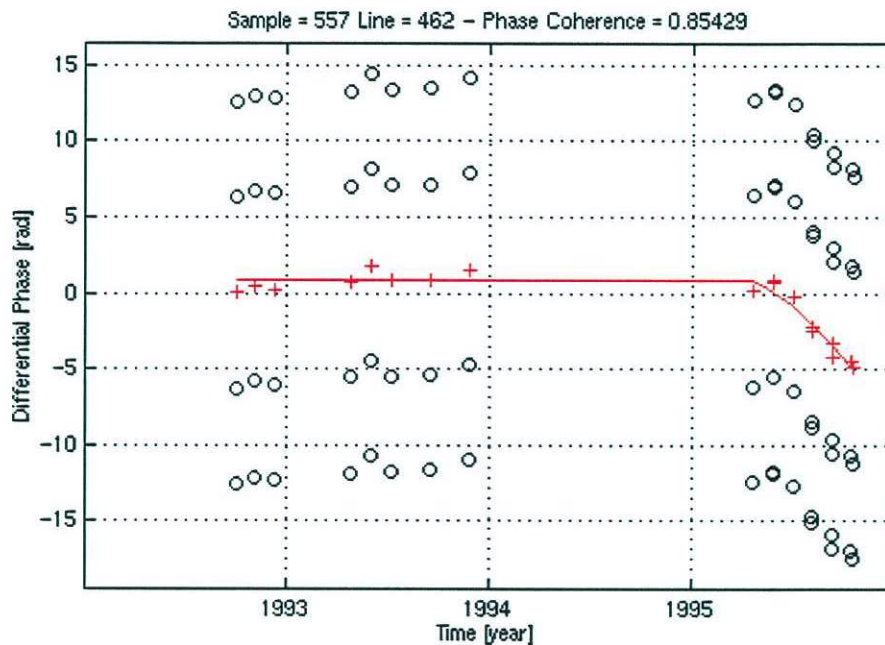


Figura 73: Serie storica corrispondenti ad uno degli edifici crollati riferite all'intervallo temporale 1992-1996

9.2 Instabilità di versante

L'analisi PSInSAR™ è in grado di monitorare con frequenza circa mensile i movimenti gravitativi sia che si tratti di analisi di dettaglio che di area vasta (e.g., Farina et al., 2006). Questa metodologia permette inoltre di studiare i fenomeni agenti anche in zone remote ed a rischio, che difficilmente sono analizzabili con le convenzionali tecniche di monitoraggio le quali richiedono l'installazione *in situ* dell'apposita strumentazione (capialdi GPS, mire ottiche, estensimetri, inclinometri). Il dato satellitare non sostituisce comunque le indagini in sito ma opportunamente integrato ad esse, anche in ambiente GIS, offre una visione areale del fenomeno, verificabile ed ottimizzabile sulla base delle verità raccolte a terra.

Bisogna tuttavia considerare che la tecnica PS si presta al monitoraggio dei fenomeni franosi con alcune limitazioni legate essenzialmente alla variabilità dell'evento calamitoso, sia in termini di evoluzione temporale che di caratteristiche morfologiche, che alla modalità di acquisizione ad opera della piattaforma satellitare. Infatti, l'analisi PS è in grado di rilevare principalmente i movimenti ad evoluzione lenta (in genere inferiori a circa 10 cm/a).

Inoltre, dal momento che i fenomeni gravitativi si verificano generalmente in aree montuose, l'applicazione della tecnica PS deve far fronte ad alcuni ostacoli legati alla topografia dell'area, che introduce problemi di deformazione prospettica, al numero ridotto di bersagli radar con proprietà tali da essere definiti *Permanent Scatterers* a causa del basso grado di urbanizzazione di queste aree ed alla presenza della copertura nevosa che, determinando

variazioni sensibili nella riflettività dell'oggetto a terra, può comportare la perdita del punto di misura (sezione 3.1.1).

La Figura 74 mostra alcune immagini scattate in seguito alla frana verificatasi il 7 marzo 2005 nel comune di Cerzeto (Cosenza). In questo caso, l'analisi PS ha permesso di ridefinire i limiti delle frane catalogate all'interno del PAI (Piano di Assetto Idrogeologico), modificare il loro stato di attività ed individuare ulteriori movimenti non rilevati precedentemente con altri sistemi.



Figura 74: Frana di Cerzeto (CS).

L'analisi di dati ERS, sia ascendenti che discendenti, acquisiti tra il 1992 ed il 2001 ha permesso di rilevare un nuovo movimento franoso in corrispondenza dell'abitato di Cavallerizzo, sito nel comune di Cerzeto; in particolare, i dati PS di entrambe le geometrie hanno permesso di stabilire con estrema precisione l'effettiva estensione dell'evento franoso, distinguendo le porzioni di territorio effettivamente in movimento da quelle stabili. I risultati PS sono stati interpretati dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze su incarico del Dipartimento di Protezione Civile. Nell'area in frana sono stati individuati 12 PS in modalità ascendente e 12 PS in modalità discendente. Combinando i dati satellitari ascendenti e discendenti e proiettando i rispettivi valori di velocità lungo la linea di massima pendenza (sezione 3.2.2), si ottengono spostamenti di entità superiore a 10 mm/a. Nella zona in frana sono individuabili inoltre due aree caratterizzate da differenti valori di velocità di deformazione. Nella porzione dell'area in frana topograficamente più elevata e con maggiore acclività (15-25°), i versi dei vettori velocità ascendenti e discendenti concordano (movimento in allontanamento dal satellite sia per i PS ascendenti che per i PS discendenti), mentre in quella topograficamente più bassa e meno acclive (10-15°), i PS ascendenti e discendenti mostrano valori di velocità opposti (PS ascendenti caratterizzati da movimento in allontanamento rispetto al satellite e PS discendenti da un movimento in avvicinamento rispetto al satellite). In base a quanto spiegato nella sezione 3.2.2, questa configurazione è spiegabile col fatto che nell'area a quota maggiore il moto presenta una componente prevalentemente verticale, mentre scendendo a quote inferiori esso tende ad acquisire una maggiore componente in direzione orizzontale a scapito di quella verticale. Dal momento che il versante è esposto verso E-NE, il quadro appena illustrato è coerente con la



presenza di un movimento roto-traslativo diretto verso E, con superficie di scivolamento fortemente curvilinea nella zona di testata⁴.

La tecnica PS è stata applicata anche allo studio dei fenomeni di deformazione gravitativa profonda di versante, DGPV (Allievi et al., 2003; Ambrosi & Crosta, 2005; Ceriani et al., 2004). L'individuazione sul territorio di fenomeni gravitativi molto lenti, come quelli di DGPV, risulta essere difficile soprattutto perché lo stato di attività del fenomeno può risultare mascherato dalla presenza di coperture detritiche e vegetali. Un esempio classicamente noto come DGPV è rappresentato da quello che interessa un'area estesa oltre 30 km² sul versante N del Monte Padrio Varadega (Sondrio), nella media Valtellina (Figura 75). L'approccio PSInSAR™ ha permesso di individuare ben 7.100 punti di misura in corrispondenza di baite, radure ed affioramenti rocciosi, un numero notevole se si considera che in genere le aree montuose per il loro scarso grado di urbanizzazione presentano pochi *Permanent Scatterers*.

Come si può osservare dalla Figura 75, il campo di velocità diminuisce tendenzialmente procedendo verso le quote più elevate, dal piede alla zona di testata (ad eccezione della porzione meridionale del versante, posta a media altitudine, che mostra tassi di deformazione elevati ma ben in sintonia con alcuni elementi geomorfologici riconosciuti con la fotointerpretazione), mostrando valori positivi di velocità nel settore inferiore del pendio. Questo risultato è in accordo con un modello geologico che prevede una superficie di rottura composta (Ambrosi & Crosta, 2005), subverticale nella zona di testata, la cui inclinazione diminuisce verso le quote più basse; i valori di velocità positivi al piede del pendio si spiegano probabilmente con un rigonfiamento dovuto all'accumulo del materiale che si frattura progressivamente o addirittura con la presenza di porzioni della superficie di rottura immergenti verso il versante (Ceriani et al., 2004).

⁴ La zona di testata è definita come la parte più alta della frana lungo il contatto tra materiale spostato e scarpata principale (Rivista Italiana di Geotecnica, 1995).

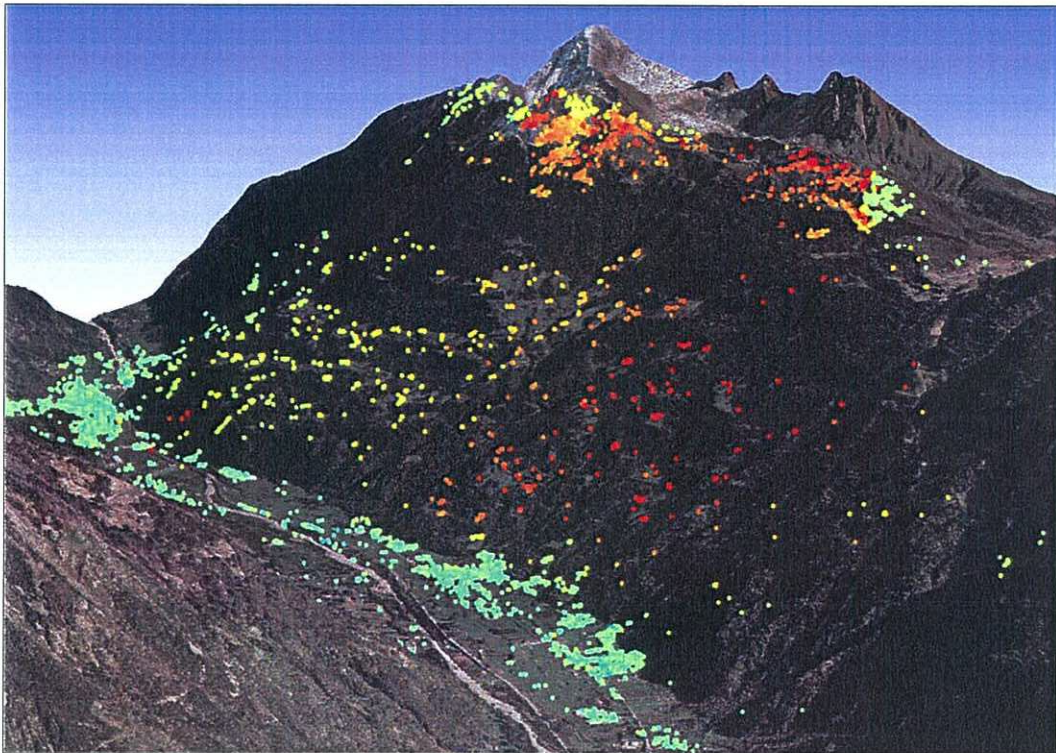


Figura 75: Rappresentazione 3-D dei PS individuati sul Monte Padrio Varadega.

L'analisi PSInSAR™ può fornire un valido ed insostituibile supporto nel censimento di fenomeni franosi a livello regionale, per la sua capacità di integrare con informazioni quantitative i risultati derivanti dall'approccio geomorfologico classico. In questi casi, l'elaborazione dei dati nelle due geometrie (ascendente e discendente) consente di ovviare a buona parte dei problemi geometrici legati all'orografia e fornisce informazioni utili a:

- verificare ed eventualmente affinare la perimetrazione dei fenomeni di dissesto
- individuare eventuali fenomeni eventualmente non emersi in fase di analisi delle caratteristiche geomorfologiche e delle informazioni bibliografiche disponibili sul territorio esaminato
- definire il grado di attività dei fenomeni sulla base della velocità di spostamento annua misurata
- in caso di coincidenza di dati nelle due geometrie, scomporre il moto nelle due componenti verticale ed orizzontale E-W



Nel seguito si riportano alcuni esempi tratti dallo studio effettuato sull'intera Valle d'Aosta, elaborando i dati ERS-1 ed ERS-2 per l'intero arco temporale coperto, in entrambe le geometrie. Grazie a ciò è stato possibile ottenere una buona copertura areale, grazie al presenza di informazioni in almeno una geometria su entrambi i versanti delle valli laterali delle, orientate per lo più N-S. I risultati dello studio PSInSAR™ sono stati sovrapposti a quelli dell'inventario dei fenomeni franosi della regione realizzato nell'ambito del Progetto IFFI.

Vengono proposti tre esempi.

Il primo riguarda la frana di Valtournanche, che rappresenta un esempio di ottima corrispondenza tra perimetrazione IFFI e dato PS. Inoltre, l'andamento degli spostamenti lungo la LOS, generalmente in allontanamento dal satellite in geometria discendente ed in avvicinamento in geometria ascendente (Figura 76 e Figura 77 rispettivamente, indica la presenza di una componente orizzontale di movimento verso ovest al piede del versante.

Il secondo esempio riguarda la DGPV di P.ta Chaligne (statale Gran San Bernardo), e rappresenta un esempio di perimetrazione che può essere rivista in base ai risultato dell'analisi PSInSAR. In Figura 78 e Figura 79 vengono riportati i risultati delle due analisi, in geometria discendente ed ascendente rispettivamente. In questo caso, i dati PS indicano che il perimetro del fenomeno risultante dal progetto IFFI va probabilmente esteso verso il basso sino al fondovalle. Come nel caso precedente, inoltre, l'analisi congiunta degli spostamenti nelle due geometrie indica l'esistenza di una componente di spostamento orizzontale diretta verso est.

Il terzo esempio riguarda il versante sinistro dell'invaso idroelettrico di Beauregard, caratterizzato dalla presenza di un fenomeno gravitativo ben noto in letteratura (G. Barla, S. Ballatore, G. Canella, R. Amici & A. Chiappane, 2005. *La deformazione gravitativa di Beauregard e la sua interazione con una grande diga ad arco gravità*. Memoria presentata in occasione dell'Incontro in Ricordo del prof. Arturo Pellegrino. Napoli, 26 settembre 2005). A causa dell'esposizione del versante, si sono ritrovati PS solo in geometria ascendente (Figura 80). Oltre ad una conferma dell'estensione del fenomeno riportata nell'inventario IFFI, la presenza di spostamenti di entità compresa tra 4.5 e 6 mm anno lungo la LOS conferma l'attività del fenomeno. Le velocità di spostamento mostrano ottima corrispondenza con i dati riportati in letteratura, ottenuti mediante ripetute campagne GPS, che nel periodo 1995-2005 hanno indicato la presenza di spostamenti con modulo 3D di circa 8 mm/anno. Nelle figure seguenti sono riportate le serie storiche degli spostamenti di tre PS, la cui ubicazione è indicata in Figura 80.

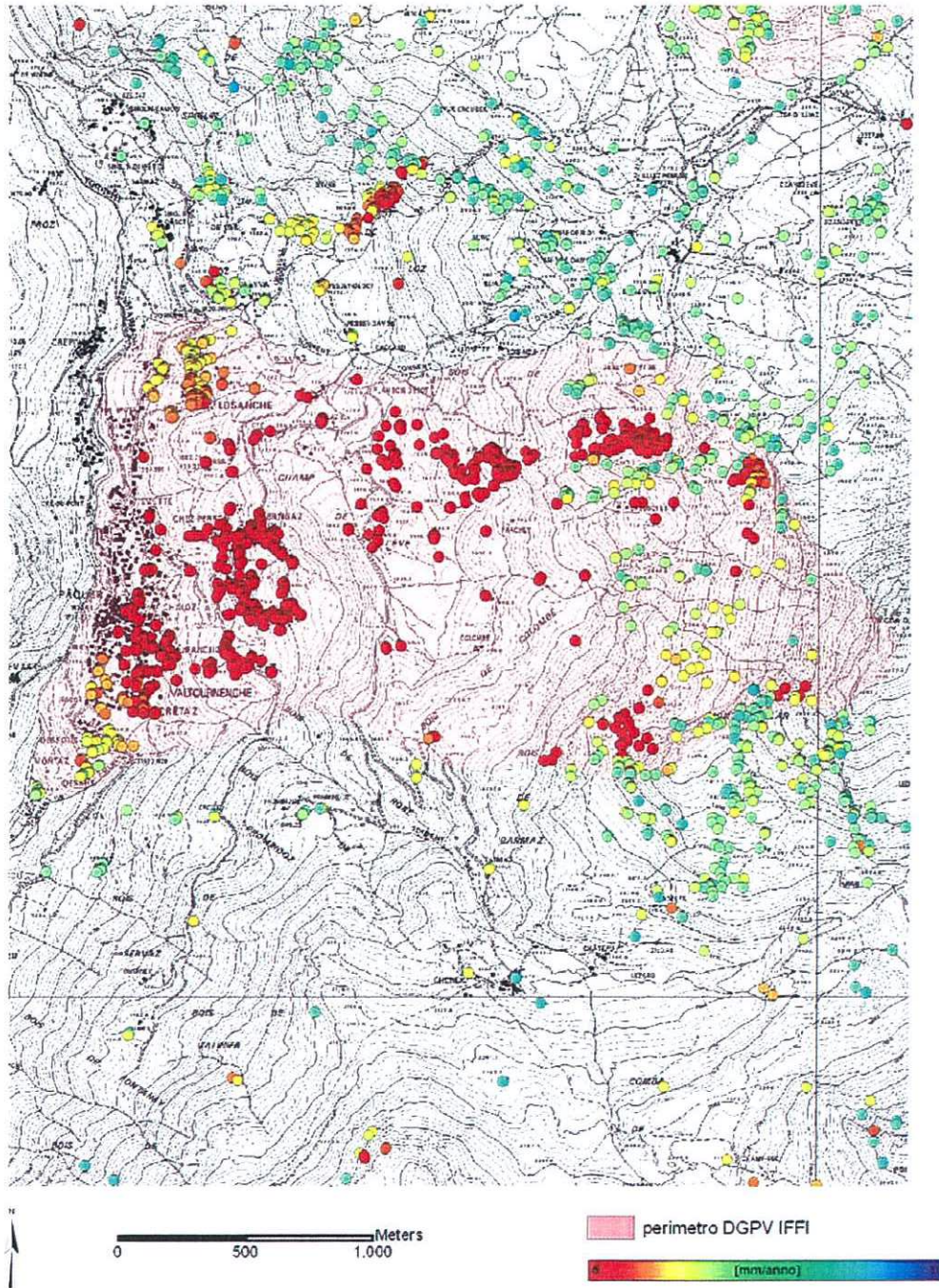


Figura 76: Particolare del campo di velocità sulla località Valtournanche (AO). Analisi Discendente .

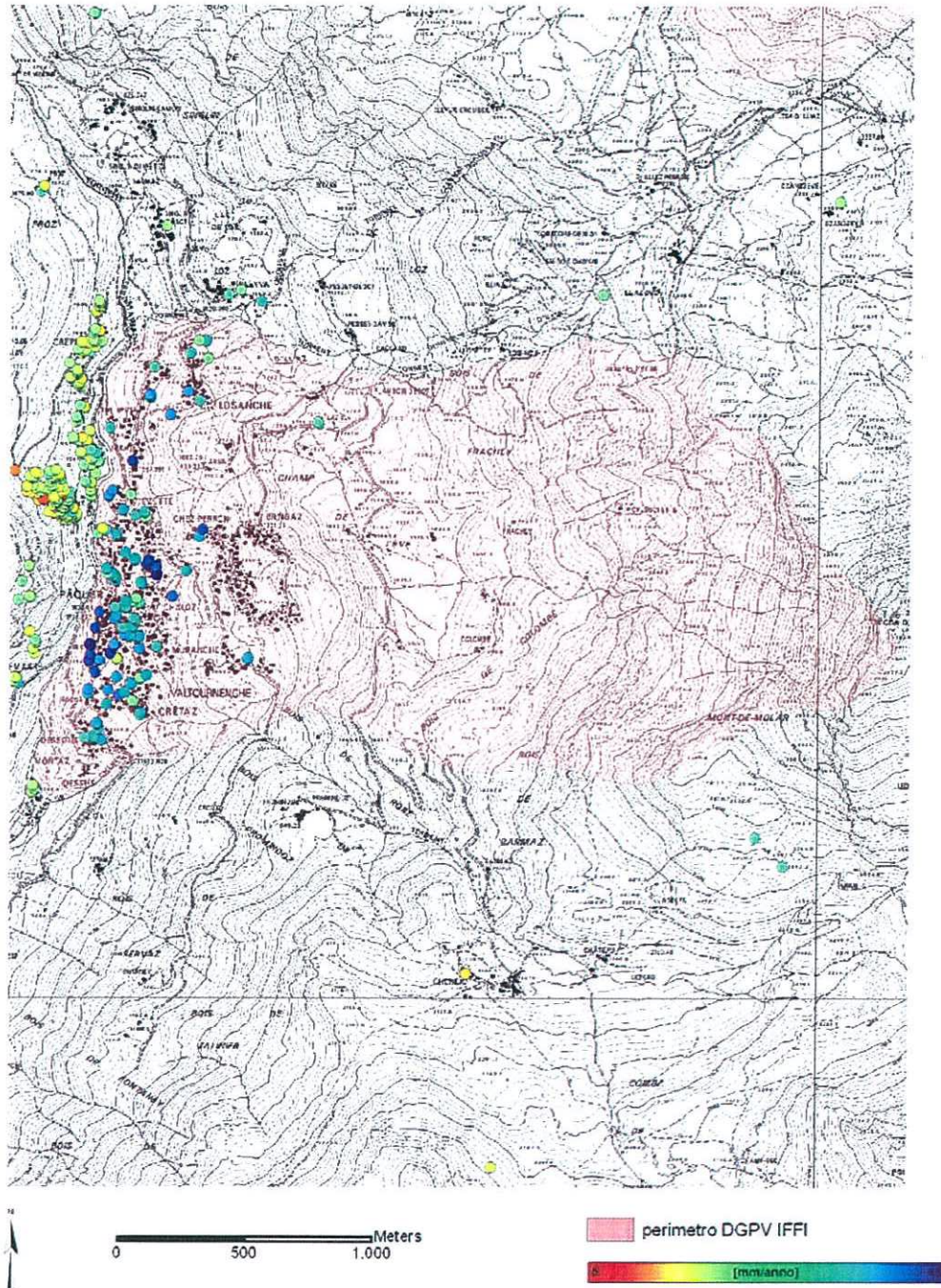


Figura 77: Particolare del campo di velocità sulla località Valtournanche (AO). Analisi Ascendente.

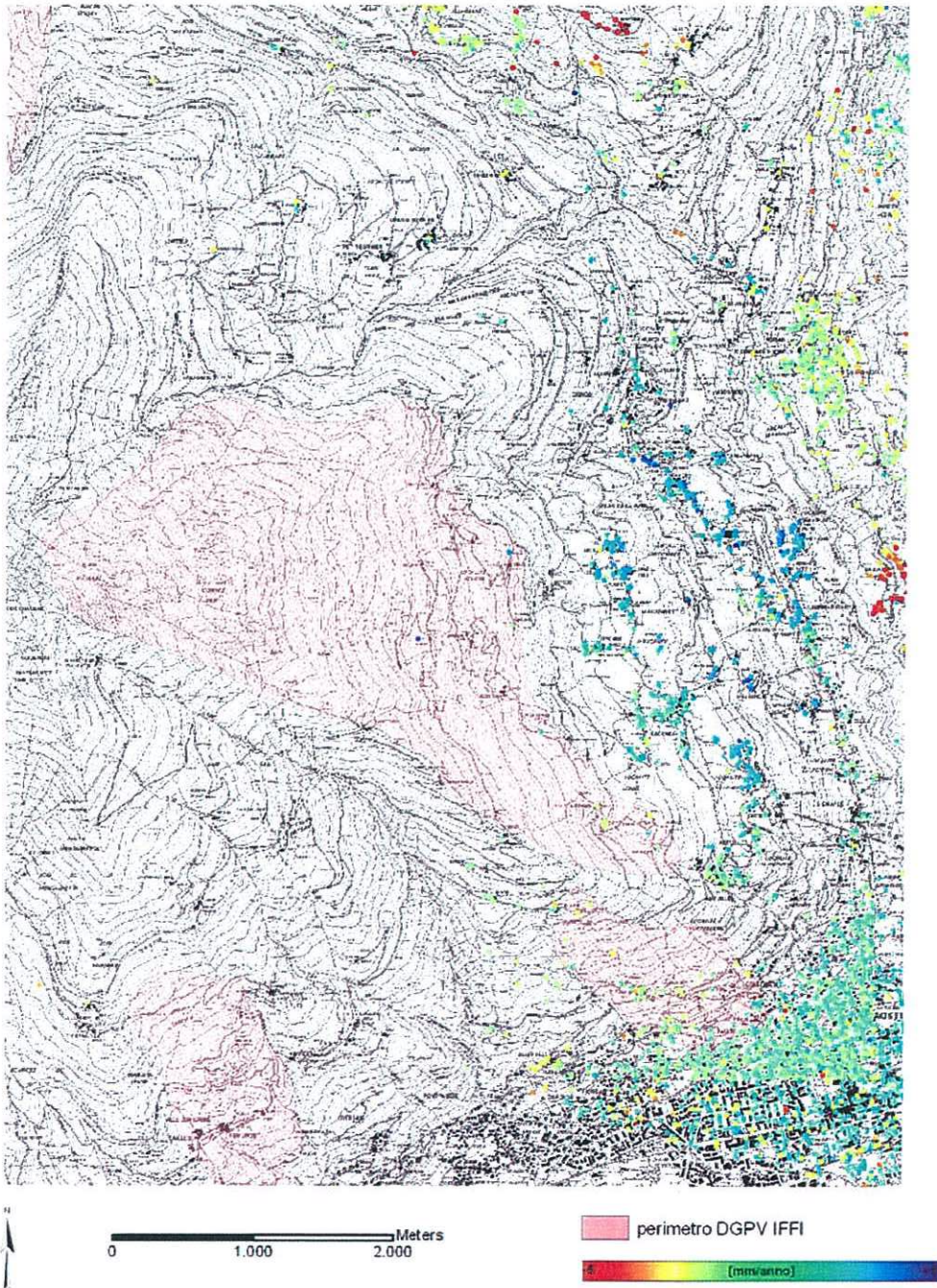


Figura 78: Particolare del campo di velocità sulla DGPV di P.ta Chaligne (AO). Analisi Discendente.

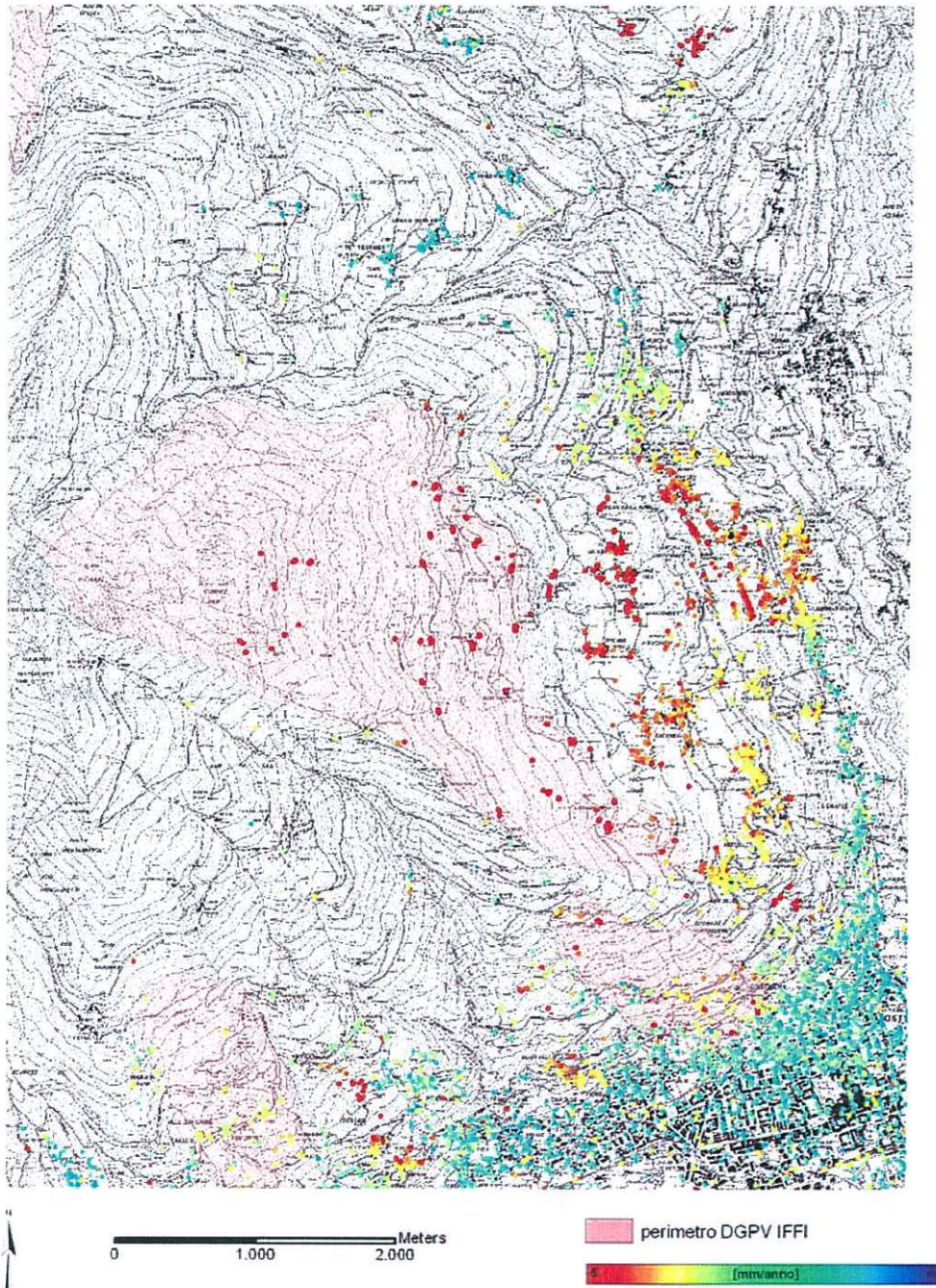


Figura 79: Particolare del campo di velocità sulla DGPV di P.ta Chaligne (AO). Analisi Ascendente.

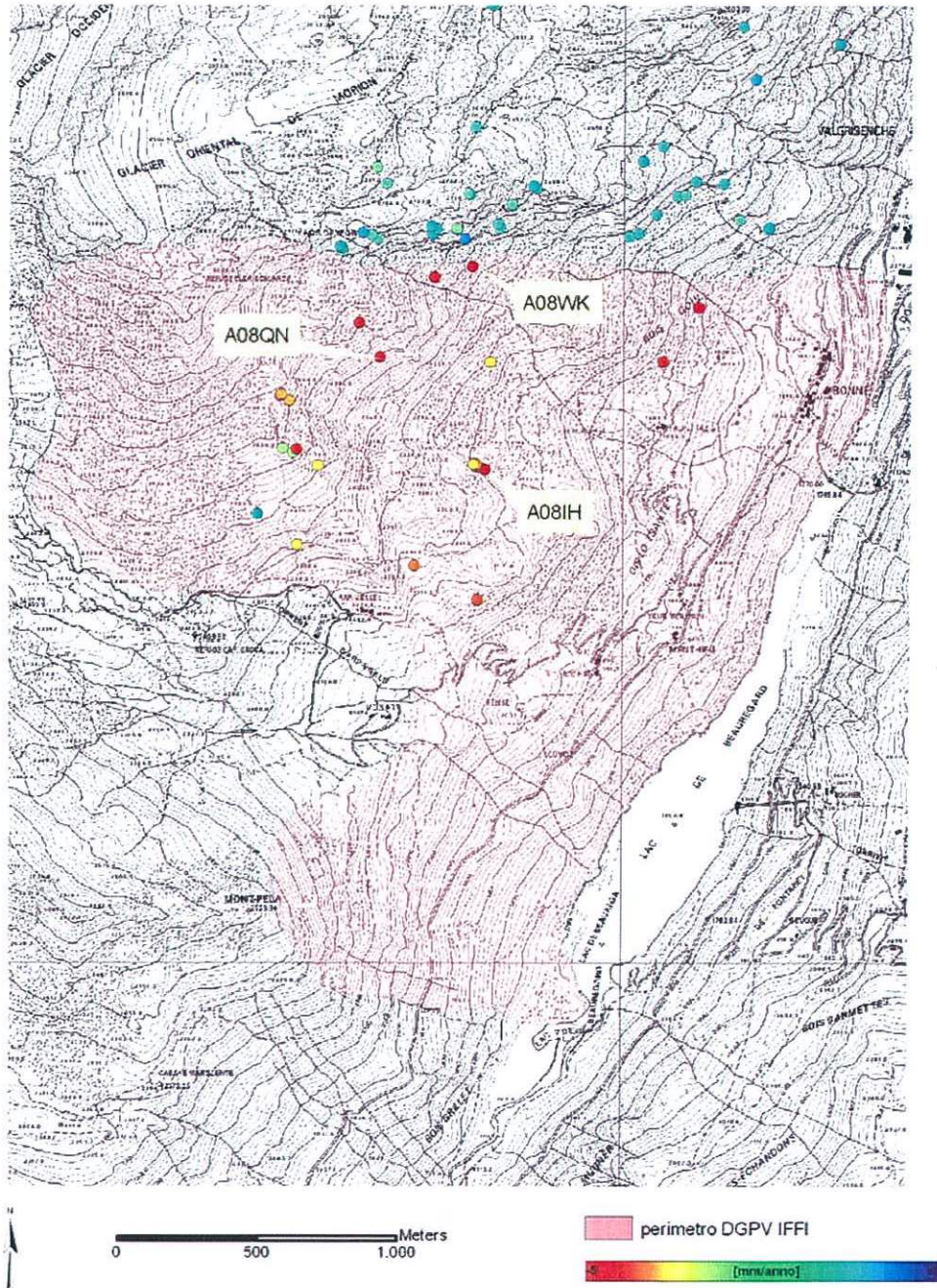


Figura 80: versante sinistro dell'invaso di Beauregard (Valgrisenche – AO), dataset Ascendente.

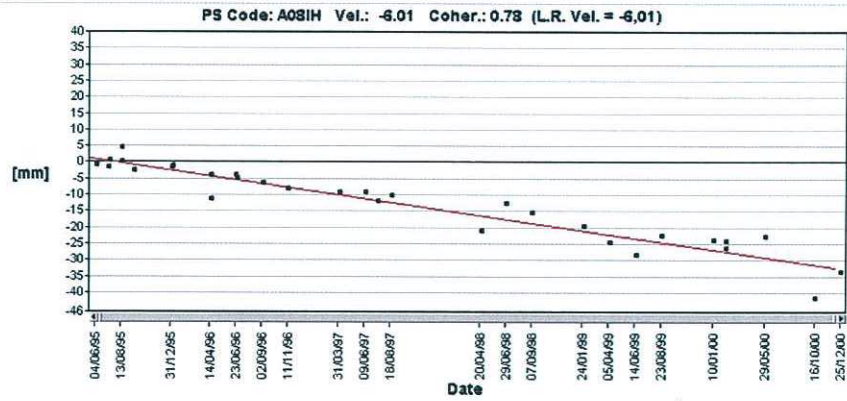


Figura 81: DGPV di Beauregard - Serie storica del punto A08IH

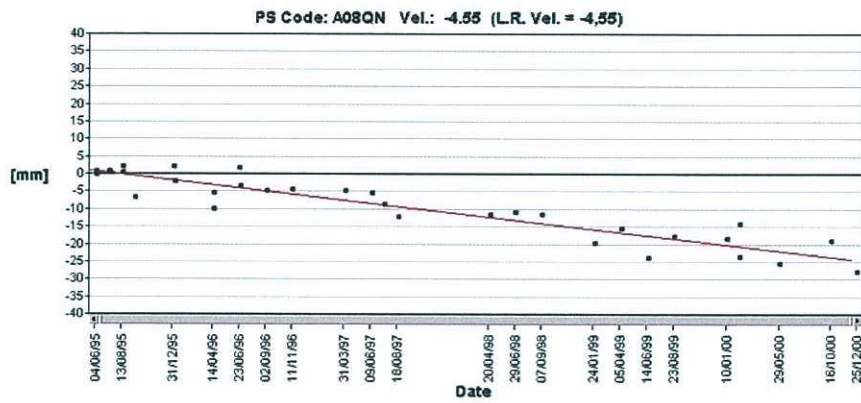


Figura 82: DGPV di Beauregard - Serie storica del punto A08QN.

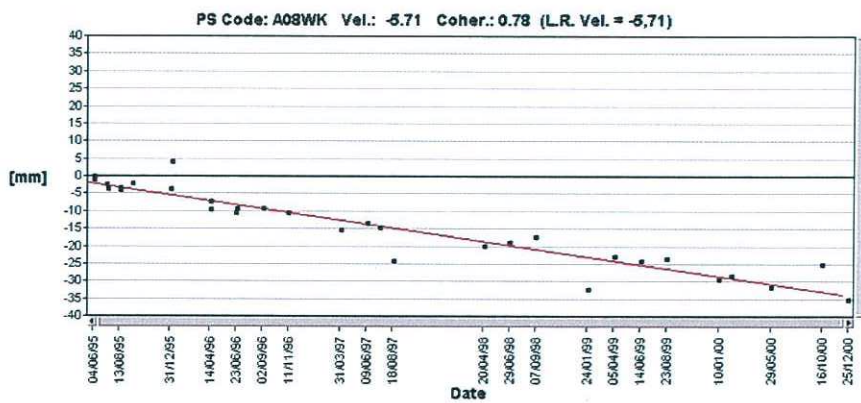


Figura 83: DGPV di Beauregard - Serie storica del punto A08WK



9.3 Faglie sismiche e vulcani

Le aree sismiche e quelle vulcaniche, essendo caratterizzate da movimenti estremamente lenti, richiedono per il loro studio un'elevata precisione del dato, che la tecnica PSInSAR™ è certamente in grado di offrire. Inoltre, per la sua competitività economica, l'analisi PS risulta un ottimo strumento di sorveglianza, utilizzabile dalla Protezione Civile, Pubbliche Amministrazione e centri di ricerca per attingere importanti informazioni da integrare in modelli di gestione e salvaguardia del territorio.

9.3.1 Aree tettonicamente attive

La baia di San Francisco (California) si trova in una zona tettonicamente attiva, controllata dal sistema di faglie di San Andreas. Su questa area sono state acquisite 49 immagini ERS tra il 1992 ed il 2000, la cui elaborazione ha condotto all'individuazione di 115487 PS (Hilley et al., 2006; Ferretti et al., 2004). L'analisi PS ha potuto rilevare la presenza di fenomeni superficiali legati all'attività tettonica, idrogeologica e geomorfologica. I moti di maggiore entità (in valore assoluto) si registrano sulle colline di Berkeley e nell'area della baia di San Francisco in prossimità di Treasure Island e di Alameda e non sono dovuti a processi tettonici (il sollevamento della zona compresa tra la Faglia di Hayward e quella di Calaveras è inferiore ad 1 mm/a) ma a processi di instabilità di versante e di subsidenza, rispettivamente (Hilley et al., 2006; Ferretti et al., 2004). In particolare, le serie storiche in corrispondenza dei PS individuati nelle aree in frana lungo i versanti delle colline di Berkeley (Figura 84) hanno messo in luce che i tassi di spostamento tendono ad aumentare durante la stagione umida, mentre si stabilizzano durante quella secca. Le serie storiche rappresentano dunque il miglior modo per osservare la relazione intercorrente tra precipitazioni, condizioni idrogeologiche e manifestarsi di eventi franosi.

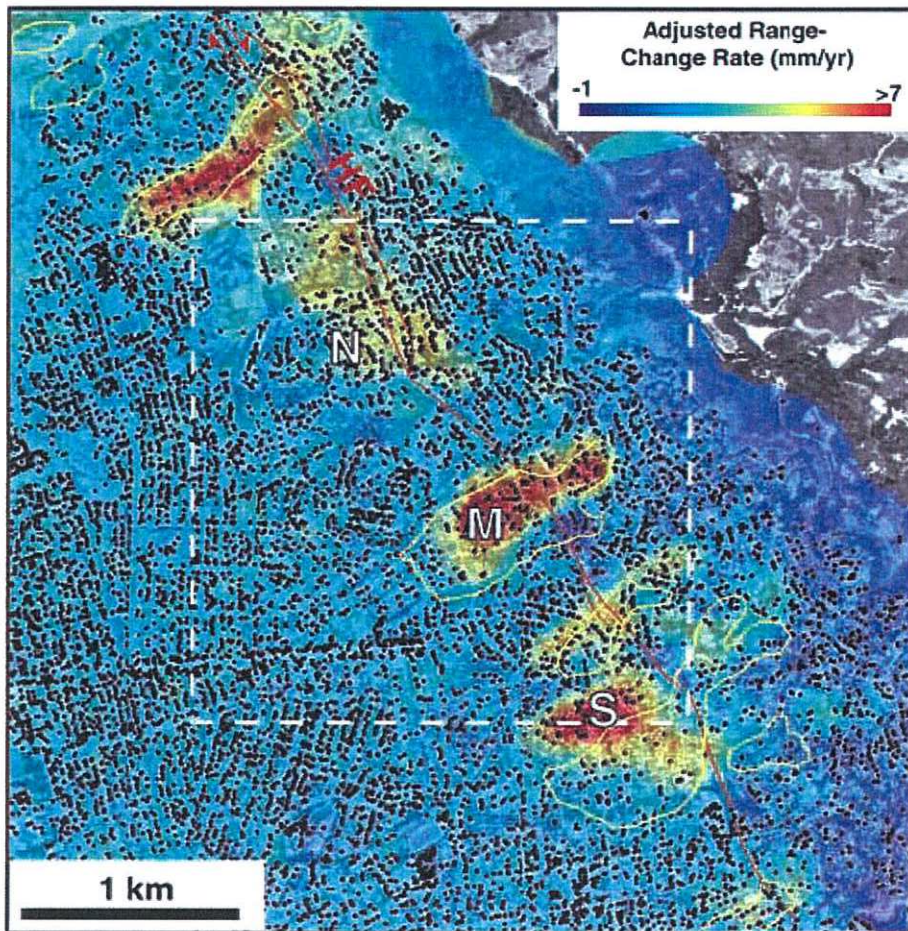


Figura 84: Area di Berkeley. Le aree di versante rappresentate in rosso corrispondono ad aree in frana (Ferretti et al., 2004).

In corrispondenza di Treasure Island, di Alameda e del settore SE di San Francisco, in cui si rileva la presenza di sedimenti non consolidati e di materiali di riporto, si registrano tassi di abbassamento fino a 0.15 m nell'intervallo temporale 1992-2000 (Ferretti et al., 2004). Le serie storiche relative a 17 PS localizzati in una zona del settore NW di Treasure Island mostrano che la subsidenza avviene rapidamente ma senza accelerazioni nel tempo (Figura 85).

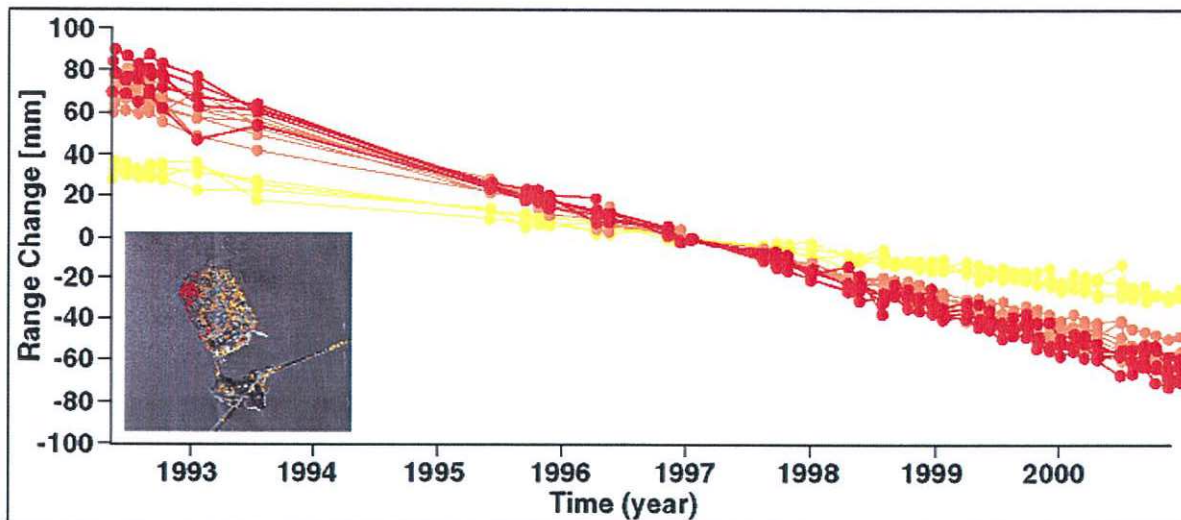


Figura 85: Serie storiche di 17 PS nell'area di Treasure Island (Ferretti et al., 2004).

9.3.2 Aree vulcaniche

Il complesso dei Colli Albani, che dista 15 km da Roma in direzione SE, è considerato un vulcano quiescente. Tuttavia, nell'area dei laghi Albano e Nemi, fin dall'epoca Romana l'attività non si è mai completamente arrestata, come dimostrano gli sciami sismici di moderata intensità e le emissioni di gas vulcanici (CO₂) (Salvi et al., 2004, cum bib.). Tra il 1951 ed il 1994 tramite livellazione è stato possibile rilevare un sollevamento nella zona dei suddetti laghi; al fine di indagare il fenomeno con una migliore risoluzione spaziale è stata eseguita un'analisi PS utilizzando in totale 99 immagini ERS (66 in modalità ascendente e 33 in modalità discendente) acquisite nel periodo 1993-2000 ed ottenendo più di 100000 PS sull'area di interesse. Da questo studio è emersa la presenza di una zona in sollevamento diretta N-S e situata sul limite occidentale della caldera, con una copertura spaziale non raggiungibile con altre tecniche di rilevamento (Figura 86).

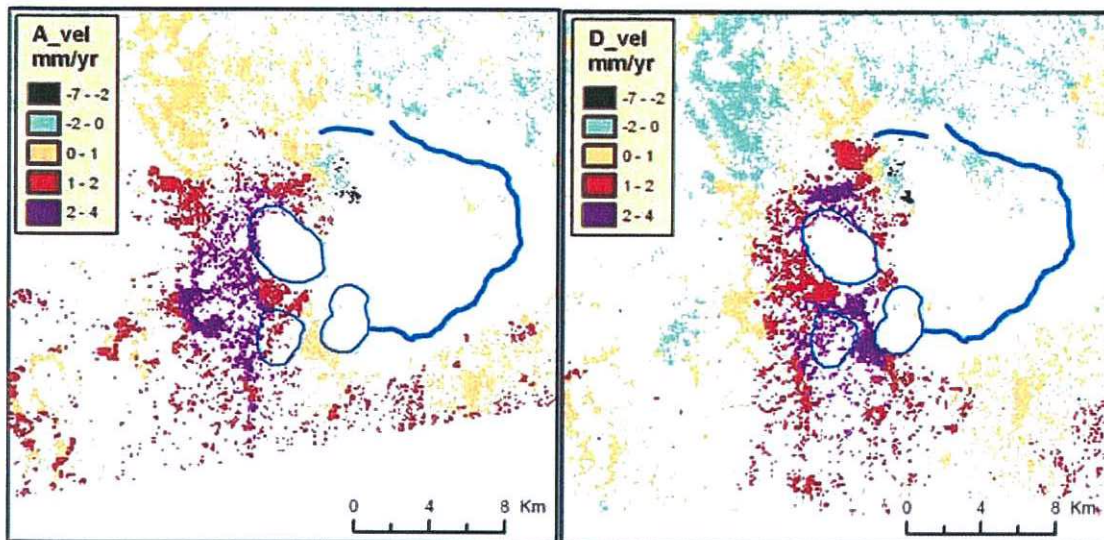


Figura 86: Distribuzione dei PS acquisiti nel periodo 1993-2000 in modalità ascendente (sx) e discendente (dx) nella zona dei laghi Albano e Nemi. I valori di velocità variano tra -7 e +4 mm/a.

9.4 Infrastrutture, singoli edifici, beni architettonici

La valutazione della stabilità delle opere antropiche superficiali richiede una elevata precisione delle misure, che certamente la tecnica PSInSAR™ è in grado di fornire. Su tali bersagli (edifici sia ad uso civile che industriale, strutture architettoniche, ponti, dighe, argini, strade, linee ferroviarie, condotte superficiali, ecc.) è possibile individuare più di un PS. Tuttavia, nel caso in cui non ci fosse alcun PS in corrispondenza della struttura da monitorare, è sempre possibile disporre i riflettori artificiali (sezione 3.1.2) in modo da creare una rete di stazioni permanenti per il monitoraggio della singola opera.

Inoltre, la disponibilità di un archivio di immagini ERS acquisite a partire dal 1992 consente di evidenziare la potenziale relazione causa-effetto tra, ad esempio, l'esecuzione di scavi sotterranei ed i danni provocati agli edifici posti nelle vicinanze dell'area di scavo.

A tal proposito, l'approccio PS è stato utilizzato come elemento probante per verificare la connessione tra i cedimenti strutturali differenziali che hanno interessato tra il 1994 ed il 1995 alcuni edifici nel centro storico di Rovigo (Veneto), tra cui alcune pregevoli opere monumentali, e la realizzazione dello scavo di un parcheggio sotterraneo. Lo studio è stato condotto nel 2002 su una zona ampia 42 ettari, analizzando 105 immagini ERS acquisite nell'intervallo 1992-2000 sia in configurazione ascendente che discendente; il numero di PS individuati nell'area in esame ammonta a 145. I risultati ottenuti, integrati e convalidati anche da perizie di tipo meccanico e geotecnico, hanno messo in evidenza che tutto il centro storico e le aree limitrofe sono affette da un fenomeno di subsidenza con un tasso di abbassamento medio pari a 1.2 mm/a (Ferretti et al., 2003). Inoltre, è stata rilevata l'esistenza di una zona di fianco al cantiere, allungata in direzione E-W, che limitatamente al

periodo 1994-1995 ha mostrato un netto cedimento, pari a circa 1,5 cm, attribuibile alla presenza di un paleoalveo in cui si concentrano terreni altamente permeabili che inducono un maggiore abbassamento della falda in seguito al suo emungimento (Ferretti et al., 2003).

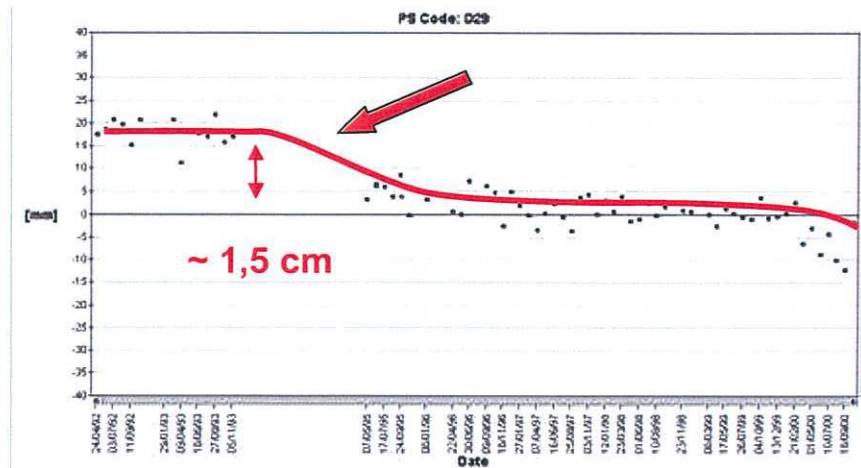


Figura 87: Serie storica di un PS posto nell'area allungata in direzione E-W adiacente al cantiere.



Appendice I: Bibliografia e riferimenti alla tecnica PSInSAR™

Bibliografia tecnica

Permanent Scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer system response to groundwater pumping and artificial recharge

J. W. Bell, F. Amelung, A. Ferretti, M. Bianchi, F. Novali
Water Resources Research, Vol. 44, February 2008, pages 1-18.

On the use of quasi-static deformation to understand reservoir fluid flow

Don W. Vasco, A. Ferretti
Geophysics, Vol. 70, N. 4, July-August 2005, pp. 13-27.

Higher Order Permanent Scatterers Analysis

Alessandro Ferretti, Marco Bianchi, Claudio Prati, Fabio Rocca
submitted to EURASIP-Journal On Applied Signal Processing, Pages 1-30

Evaluating the effect of the observation time on the distribution of SAR Permanent Scatterers

Alessandro Ferretti, Carlo Colesanti, Daniele Perissin, Claudio Prati, Fabio Rocca
FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-5

L-band PS analysis: JERS-1 results and TerraSAR - L predictions

Fabio Rocca, Kenji Daito, Alessandro Ferretti, Shigeki Kuzuoka, and Fabrizio Novali
FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-6

3D motion recovery from multiangle and/or left right interferometry

Prof. Fabio Rocca
FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-5

Generation of DEM with sub-metric vertical accuracy from 30' ERS-ENVISAT pairs

Dr Claudio Prati, Dr Carlo Colesanti, Dr Alessandro Ferretti, and Dr Fabio Rocca
FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-5

Permanent Scatterers: Precision Assessment and Multi-platform Analysis

C. Colesanti, A. Ferretti, R. Locatelli, F. Novali, G. Savio
IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3

ERS-ENVISAT Permanent Scatterers Interferometry

C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, D. Perissin, F. Rocca
IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3

Multi-Image Satellite SAR Interferometry: State of the Art and Future Trends

C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca
Paper for the Australian International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 3-5 September 2003, Pages 1-6

SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique

Carlo Colesanti, Alessandro Ferretti, Fabrizio Novali, Claudio Prati, Fabio Rocca
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, NO 7, July 2003, Pages 1685-1701

Deformation Monitoring by Satellite Radar Interferometry

Ferretti, R. Hanssen
GIM International, The Worldwide Magazine for Geomatics, Vol. 16, NO. 9, September 2002, Pages 52 - 57

Full Exploitation of the ERS Archive: Multi Data Set Permanent Scatterers Analysis

Colesanti, C. Prati, F. Rocca, A. Ferretti
Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2002, Toronto (Canada) 24-28 June 2002, VOL. 2, Pages 1234-1236, 2002

Ground Deformation Monitoring Exploiting SAR Permanent Scatterers

Colesanti, R. Locatelli, F. Novali
Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2002, Toronto (Canada) 24-28 June 2002, VOL. 2, Pages 1219-1221, 2002

Permanent Scatterers in SAR Interferometry

Alessandro Ferretti, Claudio Prati, and Fabio Rocca
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, NO. 1, January 2001, Pages 8 - 20



Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry

Alessandro Ferretti, Claudio Prati, and Fabio Rocca

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, NO. 5, September 2000, Pages 2202 - 2212

Non-Uniform Motion Monitoring Using the Permanent Scatterers Technique

Ferretti A., Prati C., Rocca F.

Proceedings FRINGE99 - 10-12 November 1999, Liège, Belgium, Pages 1-6

Monitoring Terrain Deformations Using Multi-Temporal SAR Images

Ferretti A., Prati C., Rocca F.

Proceedings CEOS99 (Committee on Earth Observation Satellites) 26-29 October 1999 - Toulouse, France, Pages 1-4

Diameters of the Orbital Tubes in Long-Term Interferometric SAR Surveys

Fabio Rocca

IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters; Vol. 1, N. 3, July 2004; pages 224-227

Bibliografia sulle applicazioni PSInSAR™

Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis

R. Burgmann, G. Hilley, A. Ferretti, F. Novali

Geology, March 2006, Volume 34, N. 3, pp. 221-224.

Subsidence and flooding in New Orleans

T.H. Dixon, F. Amelung, A. Ferretti, F. Novali, F. Rocca, R. Dokkas, G. Sella, S.W. Kim, S. Wdowinski, D. Whitman

Nature, Vol 441, June 2006, pages 587-588.

Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project.

P. Farina, D. Colombo, A. Fumagalli, F. Marks, S. Moretti.

Engineering Geology 88, 2006; Pages 200-217

Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers Technique – a case study in the east of France

C. Colesanti; S. Le Mouelic; M. Bennani; D. Raucoules; C. Carnec; A. Ferretti

International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, No. 1, 10 January 2005; Pages 201-207

Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis

George E. Hilley, Roland Bürgmann, Alessandro Ferretti, Fabrizio Novali and Fabio Rocca

SCIENCE MAGAZINE, 25 June 2004, Volume 304, Number 5679, Pages 1952-1955

InSAR Permanent Scatterer Analysis Reveals Ups and Downs in San Francisco Bay Area

Ferretti, F. Novali, R. Bürgmann, G. Hilley and C. Prati; EOS, Vol. 85, N. 34

Le deformazioni del suolo ricavate da dati satellitari in un settore a rischio sinkhole del Bacino delle Acque Albule (Lazio)

Salvi Stefano, Pirro Mario, Gasparini Calvino, Stramondo Salvatore, Pagliuca Mario Nicola, Atzori Simone, Colini Laura, Tolomei Cristiano, Doumaz Fawzi, Ferretti Alessandro, Allievi Jacopo

Convegno Nazionale G.N.G.T.S., Rome (Italy), December 15, 2004, Pages 1-8

Space-based Tectonic Modeling in Subduction Areas Using PSInSAR

R.M.W. Musson, M. Haynes, A. Ferretti; Seismological Research Letters, Volume 75, Number 5, September/October 2004, Pages 598-606

Inflation rate of the Colli Albani volcanic complex retrieved by the permanent scatterers SAR interferometry technique

S.Salvi, S. Atzori, C. Tolomei, J. Allievi, A. Ferretti, F. Rocca, C. Prati, S. Stramondo, and N. Feuillet

Geophysical Research Letters, Vol 31, 2004, Pages 1-4

Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides

C.Colesanti, J.Wasowski

International Landslide Symposium - ISL2004 ; June 28-July 2 2004 ; Rio de Janeiro, Brazil; Pages 1-6

Conventional and PS differential SAR interferometry for monitoring vertical deformation due to water pumping: the Haussmann-St-Lazare case example (Paris, France)

Dr Bénédicte Fruneau, Dr Claudie Carnec, Dr Carlo Colesanti, Prof. Benoît Deffontaines, Dr Alessandro Ferretti, Dr Stéphane Le Mouelic, Dr Anne-Marie Le Parmentier, and Prof. Jean-Paul Rudant

FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-6

SLAM, a Service for Landslide Monitoring Based on EO-Data

Dr Paolo Manunta, Nicola Casagli, Davide Colombo, Anna Maria Defflorio, Spina Domenico, Paolo Farina, Alessandro Ferretti, Eric Gontier, Kaspar Graf, Sandro Moretti, Lateltin Olivier, Marc Paganini, Francesco Palazzo, and Tazio Strozzi



- FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-6
Integration of Permanent Scatterers Analysis and High Resolution Optical Images within Landslide Risk Analysis
 Mr Paolo Farina, Mr Davide Colombo, mr Alfio Fumagalli, Mr Eric Gontier, and Dr Sandro Moretti
- FRINGE 2003 – 1/5 December 2003 – Frascati – Italy, Pages 1-8
Analisi di fenomeni di deformazione superficiale sul territorio dell'autorità dei bacini romagnoli a partire da serie di dati radar satellitari elaborati con la tecnica dei diffusori permanenti
 Jacopo Allievi; Flavio Bonsignore; Stefano Cespa; Carlo Colesanti; Davide Colombo; Alessandro Ferretti; Maurizio Morelli; Alberto Pistocchi
- ASITA 2003 – 28/31 October 2003 – Verona – Italy, Pages 1-8
Slam, the development of an EO Service to support the legal obligations of Swisse and Italian Geological Risk Services in landslide risk forecasting and prevention
 Marc Paganini, Francesco Palazzo, Olivier Arino, Paolo Mamunta, Alessandro Ferretti, Eric Gontier, Stefan Wunderle, Paolo Pasquali, Tazio Strozzi, Johannes Zilger, Cees Van Western
- IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3
Land subsidence in the Firenze-Prato-Pistoia basin measured by means of spaceborn SAR interferometry
 D. Colombo, P. Farina, S. Moretti, G. Nico, C. Prati
- IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3
Estimating orbital trajectories from fringe gradients in SAR interferograms for measuring crustal strain
 Andreas O. Hohlhase, Kurt L. Feigl, Didier Massonnet, Alessandro Ferretti
- IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3
Monitoring slow mass movements with the Permanent Scatterers Technique
 J. Allievi, C. Ambrosi, M. Ceriani, C. Colesanti, G. B. Crosta, A. Ferretti, D. Fossati
- IGARSS 2003 – 21/25 July 2003 – Toulouse – France, Pages 1-3
Valutazione degli effetti di scavi in falda sui cedimenti strutturali di edifici mediante utilizzo di tecniche satellitari SAR
 A. Ferretti, G. Franchioni, L. Jurina
- Paper presenting the results of a recent study of the causes of structural settlements observed in some monuments in the historical centre of the city of Rovigo in Italy, Pages 1-13
- Monitoring Landslides and Tectonic Motions with the Permanent Scatterers Technique**
 Carlo Colombo, Alessandro Ferretti, Claudio Prati, Fabio Rocca
- Engineering Geology, n. 68, 2003, Pages: 3-14
- Ground Deformation Monitoring in the Ranafjord area of Norway by Means of the Permanent Scatterers Technique**
 J.F. Dehls, M. Basilico, C. Colesanti
- Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2002, Toronto (Canada), 24-28 June 2002, VOL. 1, Pages 203-207, 2002
- Radar Permanent Scatterers Identification in Urban Areas: Target Characterization and Sub-Pixel Analysis**
 A. Ferretti, C. Colesanti, C. Prati, F. Rocca
- Proceedings of the Joint IEEE/ISPRS Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, Roma (Italy) 8-9 November 2001, Page 52
- Seismic Faults Analysis in California by Means of the Permanent Scatterers Technique**
 Carlo Colesanti, Alessandro Ferretti, Claudio Prati and Fabio Rocca
- Keynote Paper, Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Sheffield (United Kingdom) 11-14 September 2001, ESA SP-475, January 2002, Pages 125-131
- Comparing GPS, Optical Levelling and Permanent Scatterers**
 A. Ferretti, C. Colesanti, C. Prati, F. Rocca
- Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGAARS 2001, Sydney (Australia), 9-13 July 2001, VOL. 6, Pages 2622-2624, 2001
- Measuring Subsidence with SAR Interferometry: Applications of the Permanent Scatterers Technique**
 A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca
- Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence, Vol. II, SISOLS2000, 2429 September 2000, Ravenna, Italy, Pages: 67 – 79
- Monitoring Known Seismic Faults Using the Permanent Scatterers(PS)Technique**
 A. Ferretti, C. Colesanti, F. Ferrucci, C. Prati, F. Rocca
- Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2000, Honolulu (USA) 24-28 July 2000, VOL. 5, Pages 2221-2223
- SAR Analysis of Building Collapse by means of the Permanent Scatterers Technique**
 A. Ferretti, F. Ferrucci, C. Prati, and F. Rocca
- Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International, Vol. 7, Pages: 3219, 3221
- Modelli atmosferici per il controllo dei movimenti dell'Etna**
 A. Ferretti, A. Menegaz, C. Prati, F. Rocca, A. Bonforte, G. Puglisi
- Alta Frequenza - Rivista di Elettronica, Vol. 11, N° 4, October - December 1999, Pages 1 – 6



Tutorials

Tecnica PS: nuove misure radar per il monitoraggio ambientale

A. Ferretti, S. Cespa, C. Gervasi, G. Savio; GEOmedia, La prima rivista italiana di geomatica, N.4 2004, Pages 40-41

Monitoraggio di deformazioni superficiali a partire da dati radar satellitari elaborati con la tecnica dei diffusori permanenti

Jacopo Allievi, Carlo Colesanti, Alessandro Ferretti

La Conservazione del paesaggio, a volume seen by Simona Carnevale and published by the Department of restoration and preservation of architectural goods of the Università di Firenze, June 2003, pages 41-44

Monitorare fenomeni franosi a partire da dati radar satellitari elaborati con la tecnica dei diffusori permanenti

A. Ferretti, C. Colesanti, J. Allievi

MondoGIS, March/April 2003, Pages 26-30

Analisi di deformazione in area urbana tramite la tecnica dei Permanent Scatterers (PS)

Carlo Colesanti, Alessandro Ferretti, Davide Colombo

MondoGIS, 6th year, April 2001, Pages 24-28

Per la bibliografia completa consultare il sito web www.treuropa.com alla sezione *PSInSAR™ Technique / Publications*