

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA

Università degli Studi di Firenze



FRANCESCA CIGNA

**“Applicazione di tecniche interferometriche radar avanzate per la
mappatura rapida e il monitoraggio dei dissesti idrogeologici”**

settore scientifico disciplinare: GEO-05

Tutore: Prof. Nicola Casagli

Coordinatore: Prof. Federico Sani

XXIII CICLO

Firenze, 31 Dicembre 2010

TAVOLA DEI CONTENUTI

ACRONIMI	1
1 INTRODUZIONE	3
2 IMMAGINI SAR SATELLITARI E TECNICHE DI ELABORAZIONE	5
2.1 Immagini SAR	5
2.1.1 <i>Deformazioni prospettiche</i>	6
2.1.2 <i>Orbite e localizzazione geografica</i>	7
2.1.3 <i>Risposta degli oggetti al segnale radar</i>	9
2.2 Archivi SAR satellitari	9
2.2.1 <i>Dati SAR in banda C</i>	13
2.2.2 <i>Dati SAR in banda L</i>	15
2.2.3 <i>Dati SAR in banda X</i>	16
2.3 Interferometria SAR (InSAR)	17
2.3.1 <i>Decorrelazione (geometrica e temporale) e contributo atmosferico</i>	20
2.3.2 <i>Potenzialità e limiti</i>	21
2.4 Tecniche multi-interferogramma	23
2.4.1 <i>Persistent Scatterer Interferometry (PSI)</i>	26
2.4.2 <i>Interferogram Stacking</i>	33
2.4.3 <i>Potenzialità e limiti</i>	34
3 APPLICABILITÀ DELLE ANALISI INSAR AL CONTROLLO DEI DISSESTI	37
3.1 Analisi per tipologia	37
3.2 Analisi per velocità caratteristica	40
3.3 Analisi per copertura del suolo	41
3.4 Analisi per scala spaziale e temporale	42
4 POST-ELABORAZIONE DI DATI INSAR	45
4.1 Visualizzazione e classificazione	45
4.2 Controllo e omogeneizzazione delle misure	48
4.2.1 <i>Reference point e scalatura delle misure</i>	48
4.2.2 <i>Omogeneizzazione di dataset sovrapposti</i>	50
4.3 Elaborazioni preliminari dei risultati	50
4.3.1 <i>Interpolazione spaziale</i>	50
4.3.2 <i>Proiezione delle misure su una data direzione</i>	51
4.3.3 <i>Combinazione delle misure ascendenti e discendenti</i>	52

4.4	<i>Valutazione della sensibilità delle misure</i>	55
4.4.1	<i>Sensibilità della tecnica</i>	55
4.4.2	<i>Moti monitorabili</i>	56
4.4.3	<i>Aree monitorabili</i>	57
5	<i>RADAR-INTERPRETAZIONE</i>	59
5.1	<i>Individuazione e inventario dei fenomeni di dissesto</i>	61
5.1.1	<i>Metodologia</i>	61
5.1.1.1	Individuazione e perimetrazione di aree in movimento	62
5.1.1.2	Valutazione dello stato di attività e intensità dei fenomeni	66
5.1.1.3	Aggiornamento di mappe inventario	68
5.1.2	<i>Area test: Calabria Centrale</i>	70
5.2	<i>Caratterizzazione temporale e spaziale dei fenomeni di dissesto</i>	75
5.2.1	<i>Metodologia</i>	75
5.2.1.1	‘Back monitoring’ dell’evoluzione temporale di un fenomeno	77
5.2.1.2	Interpretazione avanzata di serie temporali PSI	78
5.2.1.3	Ricostruzione della geometria di un fenomeno	81
5.2.1.4	Confronto e integrazione con dati ancillari e in situ	82
5.2.2	<i>Area test: Naro (Sicilia)</i>	84
5.2.3	<i>Area test: Morelia (Messico)</i>	90
5.3	<i>Mappatura rapida dei dissesti e valutazione del rischio residuo</i>	93
5.3.1	<i>Metodologia</i>	95
5.3.1.1	Mappatura rapida dei dissesti	95
5.3.1.2	Valutazione del rischio residuo	98
5.3.2	<i>Area test: Agrigento (Sicilia)</i>	99
5.3.3	<i>Area test: M’dina (Malta)</i>	103
5.4	<i>Monitoraggio e sorveglianza dei fenomeni di dissesto</i>	108
5.4.1	<i>Metodologia</i>	109
5.4.1.1	Progettazione del sistema satellitare di monitoraggio e allertamento	111
5.4.1.2	Sviluppo di modelli di segnalazione di serie storiche ‘anomale’	114
5.4.2	<i>Area test: Stromboli (Sicilia)</i>	124
5.4.3	<i>Area test: L’Aquila (Abruzzo)</i>	126
5.4.4	<i>Area test: Caltanissetta (Sicilia)</i>	127
6	<i>DISCUSSIONE</i>	133
6.1	<i>Individuazione e inventario</i>	133
6.2	<i>Caratterizzazione temporale e spaziale</i>	134
6.3	<i>Mappatura rapida e valutazione del rischio residuo</i>	136
6.4	<i>Monitoraggio e sorveglianza</i>	137
7	<i>CONCLUSIONI</i>	143

BIBLIOGRAFIA	147
ALLEGATI	155
<i>Articoli su riviste internazionali</i>	
<i>Articoli su riviste nazionali</i>	
<i>Capitoli di libro e proceedings</i>	
<i>Abstracts</i>	

ACRONIMI

A-DInSAR	<i>Advanced DInSAR</i>
ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
APS	<i>Atmospheric Phase Screen</i>
ASAR	<i>Advanced SAR</i>
ASI	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
CESI	<i>Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano</i>
CNR	<i>Consiglio Nazionale delle Ricerche</i>
COSMO-SkyMed	<i>Constellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation</i>
CPT	<i>Coherent Point Target</i>
CSA	<i>Canadian Space Agency</i>
CTR	<i>Carta Tecnica Regionale</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DGPV	<i>Deformazione Gravitativa Profonda di Versante</i>
DInSAR	<i>Differential InSAR</i>
DLR	<i>Deutsches zentrum fuer Luft- und Raumfahrt</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
DPC	<i>Dipartimento di Protezione Civile</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
EC	<i>European Commission</i>
ENVISAT	<i>ENVIronmental SATellite</i>
ERS	<i>European Remote Sensing</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
EU	<i>European Union</i>
FP	<i>Framework Programme</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GMES	<i>Global Monitoring for Environment and Security</i>
GNDCI	<i>Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HR	<i>High Resolution</i>
IGM	<i>Istituto Geografico Militare</i>
IMAA	<i>Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale</i>
InSAR	<i>SAR Interferometry</i>
IPTA	<i>Interferometric Point Target Analysis</i>
IREA	<i>Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente</i>
IRPI	<i>Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica</i>
ISPRA	<i>Istituto Superiore PRotezione Ambiente</i>
IUGS/WGL	<i>International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides</i>
JAROS	<i>Japan Resources Observation System Organization</i>
JAXA	<i>Japanese Aerospace eXploration Agency</i>
JERS	<i>Japanese Earth Resources Satellite</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

NASDA	<i>NAtional Space Development Agency</i>
PAI	<i>Piano di Assetto Idrogeologico</i>
PALSAR	<i>Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i>
PREVIEW	<i>PREVention, Information and Early Warning</i>
PS	<i>Permanent Scatterers / Persistent Scatterers</i>
PSI	<i>Persistent Scatterer Inteferometry</i>
PSIC4	<i>PS Interferometry Codes Cross Comparison and Certification for long term differential interferometry</i>
PSInSAR	<i>Permanent Scatterers Interferometric SAR</i>
PSP-DIFSAR	<i>Persistent Scatterer Pairs - DIFferential SAR Interferometry</i>
PST-A	<i>Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale</i>
RADARSAT	<i>RADAR SATellite</i>
SAFER	<i>Services and Applications For Emergency Response</i>
SAR	<i>Syntethic Aperture Radar</i>
SBAS	<i>Small BASeline Subset</i>
SLAM	<i>Service for LAndslide Monitoring</i>
SPN	<i>Stable Point Network</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
StaMPS	<i>Stanford Method for Persistent Scatterers</i>
TanDEM-X	<i>TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement</i>
TPZ	<i>Telespazio</i>
TRE	<i>TeleRilevamento Europa</i>
UNIFI-DST	<i>Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Scienze della Terra</i>
UPC	<i>Universitat Politècnica de Catalunya</i>
VHR	<i>Very High Resolution</i>
WP/WLI	<i>Working Party for World Landslide Inventory</i>

1 INTRODUZIONE

L'obiettivo del presente Dottorato di Ricerca è stato quello di analizzare le potenzialità dell'uso di dati radar satellitari per la gestione del rischio idrogeologico, mediante l'applicazione dell'interferometria radar multi-temporale quale strumento operativo per la mappatura, la caratterizzazione e il monitoraggio dei dissesti, a supporto delle attività di protezione civile.

L'elevata frequenza dei fenomeni di dissesto geologico e le loro conseguenze sulla popolazione e il territorio mettono in luce la necessità di intraprendere una politica di gestione del rischio che affronti il problema sia durante le emergenze, sia attraverso l'attività di previsione e prevenzione, basata sull'individuazione delle condizioni di rischio e volta all'adozione di interventi finalizzati alla riduzione dei danni che tali fenomeni possono provocare.

Oggi, grazie allo sviluppo della conoscenza dei rischi che incombono sul territorio, si riescono a determinare con precisione sempre maggiore le aree soggette ai diversi rischi e ciò consente agli organi di protezione civile, nazionali e territoriali, di elaborare scenari per la pianificazione di emergenza sempre più dettagliati.

A supporto e integrazione dei metodi tradizionali oggi disponibili per la misura delle deformazioni del terreno, stanno progressivamente maturando le più moderne e avanzate tecniche di telerilevamento satellitare. Tali tecniche, grazie alle caratteristiche di copertura areale e multi-temporalità delle riprese, possono supportare le metodologie geologiche, geomorfologiche e analitiche convenzionali, per l'individuazione dello stato di attività dei dissesti, lo studio della loro evoluzione nel tempo e la valutazione della loro estensione areale.

Tra i sistemi di telerilevamento disponibili assumono particolare rilevanza i sensori radar satellitari. Tali sistemi, rispetto a quelli ottici, operano con continuità (possono acquisire dati in qualsiasi condizione atmosferica, sia di giorno sia di notte) e si prestano bene per lo studio delle deformazioni in aree urbane (presenza di oggetti che riflettono bene il segnale).

Negli ultimi anni sono state sviluppate diverse tecniche di elaborazione dei dati radar satellitari finalizzate allo studio delle deformazioni superficiali, dall'interferometria differenziale convenzionale ai più moderni approcci multi-interferogramma. Tali tecniche si sono rivelate uno strumento con elevatissime potenzialità nel controllo delle deformazioni superficiali e, in particolare, per lo studio di fenomeni franosi, subsidenza e sollevamento, movimenti tettonici e faglie sismiche, attività vulcanica e dinamica dei ghiacciai.

Il presente Dottorato di Ricerca si è posto dunque l'obiettivo di analizzare, discutere criticamente e perfezionare le metodologie di interpretazione delle misure interferometriche multi-temporali, a supporto delle attività di: i) individuazione e inventario dei fenomeni di dissesto; ii) caratterizzazione temporale e spaziale (determinazione della tipologia, estensione e cause dei dissesti); iii) mappatura rapida e valutazione della pericolosità e del rischio residui.

Questi approcci sono già stati in parte implementati nel corso di recenti progetti italiani e europei, quale SLAM (*'Services for landslide monitoring development'*, finanziato da ESA), e sono attualmente oggetto di ulteriore impiego e sperimentazione nell'ambito di progetti nazionali e internazionali quali SAR.net (*'Rete per il monitoraggio dei movimenti del terreno mediante radar ad apertura sintetica nell'ambito del sistema di sorveglianza nazionale per il rischio idrogeologico'*, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile), TerraFirma (*'A Pan-European ground motion information service in support of policies aimed at protecting the citizen against natural and anthropogenic ground motion hazards'*, finanziato da ESA nell'ambito di GMES) e SAFER (*'Services and Applications For Emergency Response'*, programma EC-FP7 nell'ambito di GMES).

La ricerca alla base del presente Dottorato è stata condotta attraverso l'implementazione di tali metodologie su alcune aree test nazionali e internazionali, appositamente selezionate per le loro caratteristiche geologiche e per la diversità e varietà dei loro *trend* deformativi caratteristici. In tal modo è stato possibile analizzare l'applicabilità delle suddette metodologie,

nonché valutare la loro esportabilità, flessibilità e scalabilità per l'analisi di fenomeni relativi a diversi contesti ambientali.

Oltre che sulle applicazioni di individuazione, caratterizzazione e mappatura, la presente ricerca si è focalizzata sullo sviluppo di un sistema satellitare di monitoraggio e sorveglianza dei fenomeni di dissesto. Attualmente, l'attività di monitoraggio per il rischio idrogeologico connesso ai movimenti di massa localizzati (frane, subsidenza, sprofondamenti, ecc.) è in fase di organizzazione, al contrario di quanto accade per il sistema di previsione e allerta meteo, già gestito da un efficace sistema nazionale di allertamento capace di identificare l'approssimarsi di condizioni di criticità e attivare le conseguenti azioni di contrasto (Dir. P.C.M. del 27/02/2004).

Pertanto, nell'ambito della presente ricerca sono state preliminarmente progettate le diverse fasi di un futuro sistema di sorveglianza basato sull'uso di analisi interferometriche multi-temporali. Inoltre, grazie ad alcune sperimentazioni condotte su aree test italiane, sono state affrontate e discusse le attuali potenzialità e limitazioni della metodologia proposta, e sono stati evidenziati i principali requisiti per l'utilizzo futuro operativo di questa metodologia a 'scala nazionale' e in 'tempo reale'.

La presente Tesi di Dottorato è organizzata in sette sezioni, articolate e concatenate mediante la seguente struttura:

- Sezione 2: **'Immagini SAR satellitari e tecniche di elaborazione'**

Viene fornito un inquadramento generale sulle immagini radar satellitari e sulle differenti tecniche interferometriche. Vengono presentati sia gli aspetti ed i parametri tecnici caratterizzanti le singole acquisizioni e gli archivi SAR delle diverse agenzie spaziali, sia i diversi approcci per l'elaborazione degli stessi, affrontando le loro potenzialità e i limiti nei confronti dello studio di fenomeni deformativi.

- Sezione 3: **'Applicabilità delle analisi InSAR al controllo dei dissesti'**

Si analizza criticamente l'applicabilità delle analisi interferometriche satellitari per il controllo dei diversi fenomeni di dissesto, in relazione alle tipologie e proprietà spazio-temporali dei dissesti ed anche ai diversi parametri caratterizzanti le misure interferometriche.

- Sezione 4: **'Post-elaborazione di dati InSAR'**

Si presentano le diverse fasi di post-elaborazione delle misure interferometriche e si descrivono i principi scientifici e tecnici che reggono e governano l'utilizzo dei dati interferometrici, InSAR e PSI, per analisi di deformazioni superficiali. Vengono descritte le fasi di visualizzazione e classificazione, controllo e omogeneizzazione, elaborazione preliminare (interpolazione spaziale, proiezione, combinazione dei dati), nonché di valutazione della sensibilità delle misure.

- Sezione 5: **'Radar-interpretazione'**

Include la descrizione delle diverse metodologie di 'radar-interpretazione'. Vengono descritti in dettaglio gli approcci di individuazione e inventario, caratterizzazione temporale e spaziale, mappatura rapida e valutazione del rischio residuo, monitoraggio e sorveglianza. Per ciascuno di essi, sono presentate una o più sperimentazioni su aree test, appositamente scelte per valutare il potenziale degli approcci proposti.

- Sezione 6: **'Discussione'**

Sono affrontate e discusse le principali potenzialità e limitazioni delle diverse metodologie di radar-interpretazione, in relazione ai risultati ottenuti mediante i differenti studi e sperimentazioni condotti nell'ambito della presente ricerca.

- Sezione 7: **'Conclusioni'**

Sono presentate sinteticamente le principali conclusioni della ricerca.

2 IMMAGINI SAR SATELLITARI E TECNICHE DI ELABORAZIONE

2.1 Immagini SAR

Il radar (*RADio Detection And Ranging*), è un sensore di tipo attivo che opera nel campo delle microonde (lunghezza d'onda, λ da 1 mm a 1 m) e, in quanto tale, è capace di acquisire in presenza di qualunque condizione atmosferica (le lunghezze d'onda delle microonde possono penetrare le nuvole, la pioggia, il fumo, lo smog) e sia di giorno che di notte (la fonte energetica che illumina gli oggetti è il sensore stesso). Il funzionamento di tale sensore è basato su l'invio di un impulso di energia che si propaga nello spazio sotto forma di un'onda elettromagnetica, incide sugli oggetti al suolo e subisce un fenomeno di riflessione disordinata (*scattering*). Una parte del segnale ritorna verso il sensore e un'antenna di ricezione registra le sue caratteristiche.

I sistemi radar sono in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico (*detecting*) e, misurando il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione dell'onda inviata verso il bersaglio, valutare la sua distanza dal sensore (*ranging*), 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, cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante, consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione, detta di *azimuth* (Fig. 1).

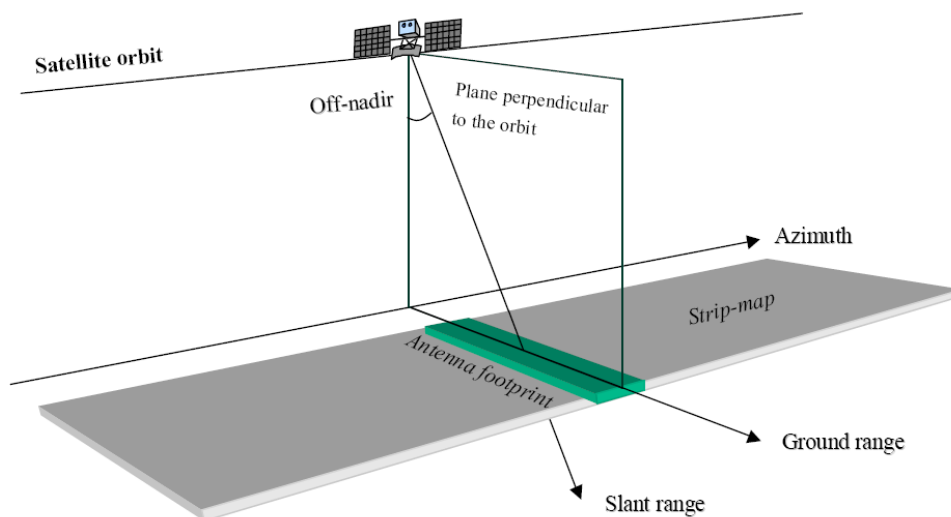


Fig. 1 - Geometria di acquisizione di un sensore SAR montato su piattaforma satellitare (Ferretti et al., 2000b).

Le immagini acquisite dal radar sono registrate nel sistema di riferimento di coordinate *range* ed *azimuth* e, in tali direzioni, sono caratterizzate da due diverse risoluzioni spaziali¹. La risoluzione in *range* o *slant-range* o *LOS* (*Line Of Sight*), riferita alla direzione di propagazione del segnale trasmesso dall'antenna radar, è legata al tempo impiegato dall'impulso di energia per compiere il doppio percorso segnale-bersaglio e, la sua proiezione a terra è detta risoluzione in *ground-range*. La risoluzione in *azimuth*, ossia nella direzione di moto della piattaforma su cui è posto il sensore, è inversamente proporzionale alla lunghezza L dell'antenna e, pertanto, quanto più grande è l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta a terra e, di conseguenza tanto meglio è localizzato il bersaglio.

¹ La risoluzione spaziale è l'area minima sul terreno vista dallo strumento da una certa altezza, cioè la distanza minima entro la quale due oggetti appaiono distinti nell'immagine. Essa viene rappresentata dalla dimensione al suolo del *pixel* che compone l'immagine.

Introducendo il concetto di SAR (*Synthetic Aperture Radar*, Radar ad Apertura Sintetica) si raggiunge un compromesso tra risoluzione nella direzione di *azimuth* ed estensione dell'area osservata, combinando coerentemente (cioè tenendo conto di ampiezza e fase del segnale ricevuto) i dati acquisiti dal sensore nelle diverse posizioni successive occupate e sintetizzando un'antenna fittizia di grandi dimensioni a partire da una lunghezza reale molto ridotta (Fig. 2).

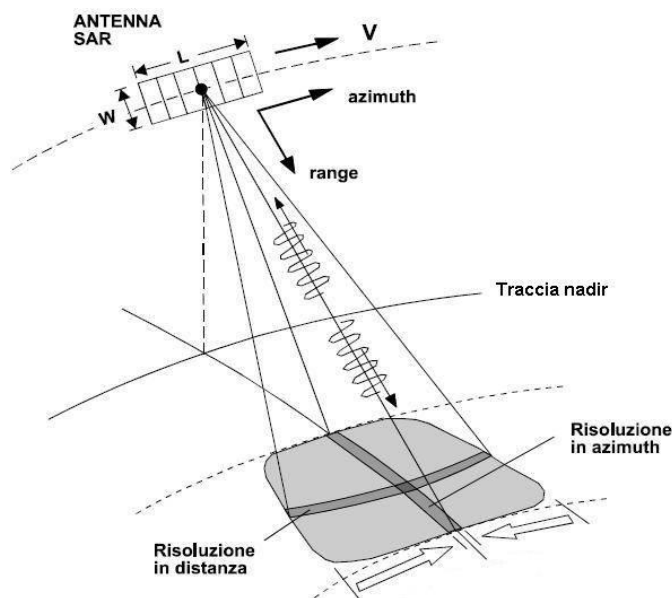


Fig. 2 - Modalità di acquisizione di un sistema SAR (Casella & Galetto, 1998).

2.1.1 Deformazioni prospettiche

I sistemi radar montati su piattaforme satellitari o su aerei sono dotati di una particolare geometria di acquisizione, detta *off-nadir* o ripresa laterale. In tali sistemi l'antenna è collocata su uno dei lati della piattaforma di osservazione e gli impulsi di energia sono inviati secondo una direzione trasversale a quella di avanzamento del velivolo² e inclinata di un angolo θ rispetto alla verticale, detto angolo di *off-nadir* o angolo di vista (Fig. 1). Tale geometria di acquisizione comporta la presenza nelle immagini SAR di alcune deformazioni prospettiche nella direzione perpendicolare alla linea di volo, causate dalla topografia del terreno (Lillesand & Kiefer, 1987).

In base alla pendenza dell'area in analisi si distinguono tre tipi di distorsioni (Fig. 3):

- *foreshortening*: si verifica quando la pendenza del terreno è minore dell'angolo di *off-nadir* θ e tende ad essere perpendicolare alla linea di vista; in questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo *pixel* molto luminosi.
- *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. L'effetto è evidente soprattutto nelle zone vicine alla proiezione a terra della rotta.
- *shadowing*: si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso radar perché schermate da altri oggetti e quindi risultano in ombra; si producono quindi nell'immagine di ampiezza aree molto scure (zone in ombra).

² I sistemi satellitari generalmente acquisiscono in configurazione *right-looking*, ovvero riprendono la superficie da indagare guardando verso destra rispetto alla direzione di avanzamento della piattaforma su cui sono installati. L'inclinazione della linea di vista del radar è necessaria per evitare che oggetti posti simmetricamente a destra e a sinistra dell'orbita (e quindi alla stessa distanza dal radar) producano dei ritorni simultanei verso il sensore, rendendo impossibile distinguere la posizione dei due oggetti a terra.

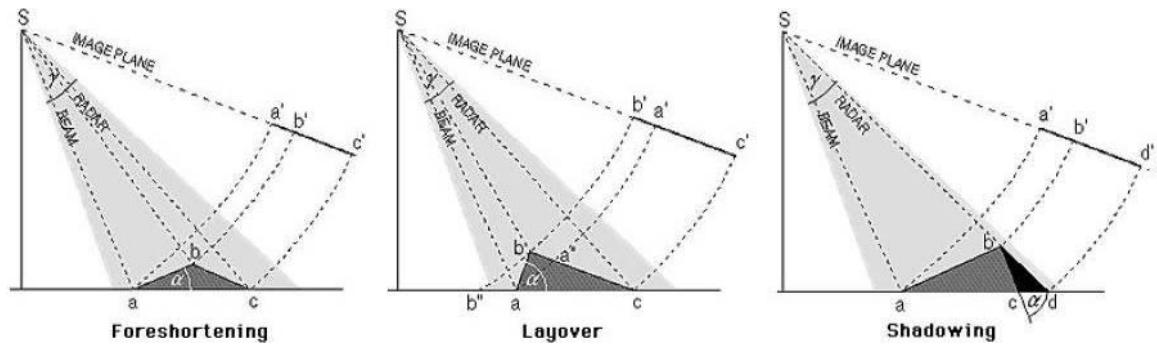


Fig. 3 - Deformazioni prospettiche: *foreshortening*, *layover*, *shadowing* (<http://www.asf.alaska.edu>).

2.1.2 Orbite e localizzazione geografica

Le orbite dei satelliti dotati di sensori radar a bordo sono generalmente di tipo eliosincrono³. Grazie alla combinazione del moto di rotazione della Terra e del movimento del satellite lungo la sua orbita, la stessa area a terra può essere osservata da due linee di vista differenti durante i passaggi ascendenti e discendenti del satellite. Le orbite sono inclinate di qualche grado rispetto ai meridiani (Fig. 4) e, durante i passaggi ascendenti, l'area ripresa viene vista approssimativamente da ovest verso est mentre, durante quelli discendenti, da est verso ovest.



Fig. 4 - Geometria di acquisizione ascendente e discendente per i satelliti ERS dell'ESA (Colesanti et al., 2003a; Farina et al., 2006).

Le due geometrie di acquisizione producono dunque deformazioni prospettiche che si sviluppano in verso opposto (Fig. 5). Di conseguenza, per le zone montuose la scelta della geometria di acquisizione più opportuna dipende dall'esposizione dei versanti di interesse. Bisogna infatti assicurarsi che le caratteristiche geometriche del versante siano compatibili con l'orientazione della linea di vista del satellite in configurazione ascendente o discendente, cioè bisogna verificare che nella geometria scelta non si creino sul versante eccessive deformazioni prospettiche (cfr. 2.1.1). Poiché i fenomeni di *foreshortening* avvengono lungo le superfici esposte verso il sensore, la geometria di acquisizione discendente permette di indagare più efficientemente versanti esposti ad ovest e, al contrario, per quelli esposti ad est, è più idonea la geometria di acquisizione ascendente (a meno delle porzioni di territorio che risultano nascoste rispetto linea di vista del satellite).

La localizzazione geografica di ogni immagine SAR è individuata dai due numeri *track* e *frame* (Fig. 6). Il *track* (traccia) è il numero che identifica l'orbita percorsa dal satellite e il *frame* è il numero progressivo dell'immagine, cioè la porzione della traccia su cui sono stati

³ Un satellite percorre un'orbita eliosincrona, ovvero sincrona con il Sole, per garantire una costante illuminazione dei pannelli solari che forniscono l'energia agli apparati di bordo. I satelliti che seguono orbite eliosincrone passano sulla stessa zona della Terra sempre alla stessa ora.

acquisiti i dati. Il territorio nazionale viene dunque ricoperto con immagini SAR dei vari satelliti sia in geometria ascendente sia discendente, che per ciascun satellite e ciascuna geometria sono identificabili attraverso i numeri di *track* e *frame* (Fig. 7).

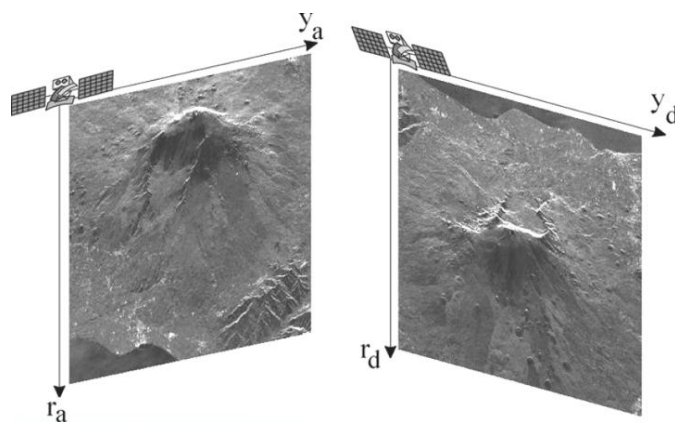


Fig. 5 - Sviluppo di deformazioni prospettiche sul rilievo del Monte Etna, nelle geometrie di acquisizione ascendente e discendente (Ferretti et al., 1998).

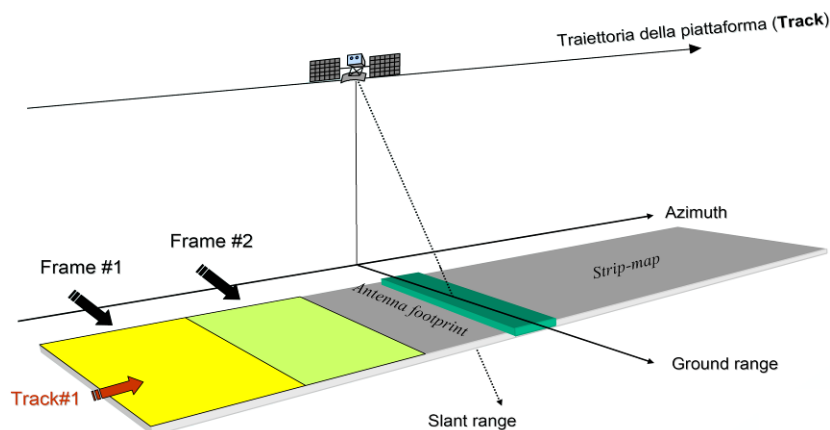


Fig. 6 - Identificazione delle immagini SAR satellitari (TRE, 2008a).

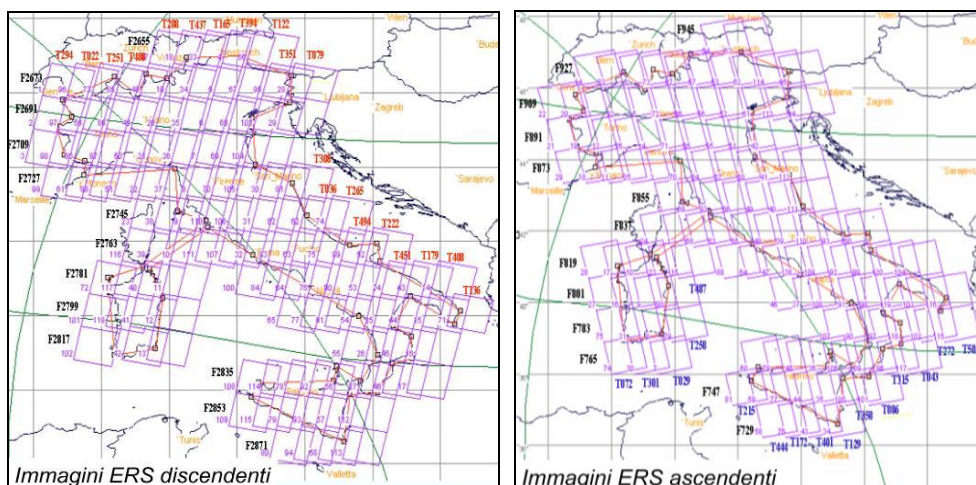


Fig. 7 - Copertura dell'Italia con immagini SAR acquisite dai satelliti ERS in geometria discendente e ascendente (TRE, 2008a).

2.1.3 Risposta degli oggetti al segnale radar

Le informazioni geografiche di carattere generale contenute in un'immagine ottica ed in una radar sono le stesse, tuttavia in quest'ultima si può notare come le strutture al suolo rispondano in modo differente alle onde elettromagnetiche emesse e, superfici che nelle immagini ottiche sono scabre, appaiono lisce se analizzate con le microonde (Fig. 8). La risposta di un oggetto al segnale radar è infatti influenzata dalle caratteristiche geometriche della superficie indagata (orientazione, pendenza e scabrezza), dalle sue caratteristiche dielettriche, dalla presenza di specchi d'acqua, dalla presenza di vegetazione e dall'umidità del suolo.

Le strade e gli specchi d'acqua appaiono neri poiché riflettono specularmente il campo trasmesso, le aree vegetate riflettono un segnale di media intensità (*pixel* grigi in Fig. 8), mentre le strutture metalliche, le rocce esposte e le aree urbanizzate sono particolarmente luminose (*pixel* bianchi in Fig. 8). Più elevata è la rugosità della superficie indagata, maggiore è l'energia retrodiffusa verso il sensore, al contrario, le superfici lisce riflettono tutto il segnale in direzione opposta a quella di provenienza pertanto il segnale di ritorno al sensore è più debole.

L'entità del segnale di ritorno in superfici ricoperte da vegetazione dipende dalla dimensione media dell'elemento del vegetale in cui l'onda impatta, infatti, se la lunghezza d'onda è circa uguale a tale dimensione media, si avrà una risposta forte. Gli specchi d'acqua producono invece una risposta speculare se l'acqua è calma e al contrario, se l'acqua è increspata o sono presenti onde, si può registrare una risposta variabile.

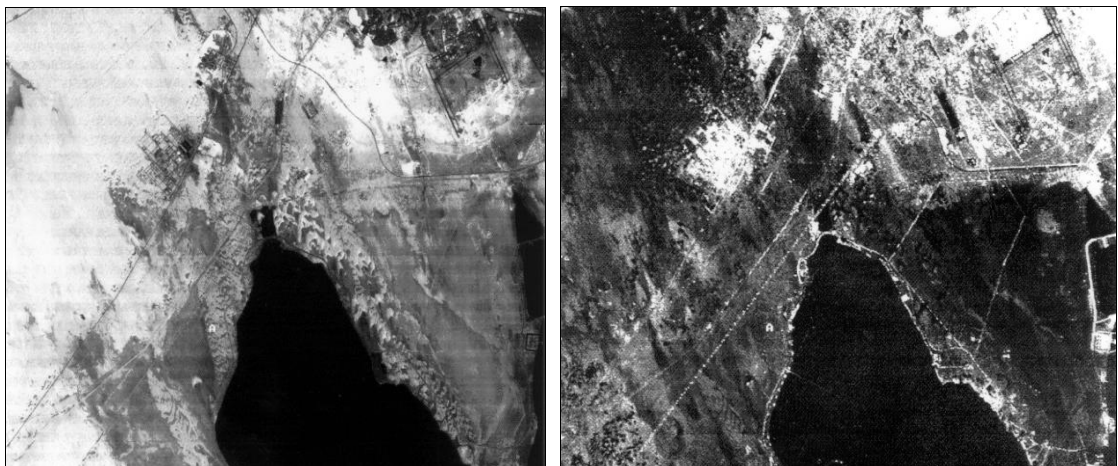


Fig. 8 - Immagine Landsat TM (sinistra) e immagine SAR (destra) di Az Zaharan, Arabia Saudita (Dabbagh et al., 1996).

2.2 Archivi SAR satellitari

La conoscenza delle caratteristiche operative dei sensori e della copertura spaziale e temporale delle immagini è il punto di partenza per intraprendere un'analisi interferometrica dei dati SAR satellitari. A oggi sono disponibili su varie aree del pianeta immagini provenienti da molteplici sensori, di diverse caratteristiche e potenzialità.

Un ruolo fondamentale nella scelta dei dati di partenza per effettuare un'analisi è svolto dalla disponibilità di grandi archivi di immagini SAR costituiti dalle varie agenzie spaziali. Questi archivi rappresentano una risorsa molto preziosa perché permettono di avviare oggi analisi su fenomeni avvenuti nel passato (concetto del '*back monitoring*'; Cigna et al., under review; cfr. allegato). Tra gli archivi di immagini SAR satellitari più rilevanti, va ricordato l'archivio di immagini ERS creato dall'Agenzia Spaziale Europea e comprendente acquisizioni in entrambe le geometrie, discendente ed ascendente, ricoprenti l'intervallo temporale 1992-2001. Per fenomeni avvenuti negli ultimi anni, si fa invece riferimento principalmente all'archivio di immagini ENVISAT dell'ESA e per il territorio italiano si può utilizzare l'archivio di immagini acquisite dal satellite RADARSAT-1 della CSA, costituito a partire dal 2003.

Prima di procedere con la descrizione delle missioni, si fornisce una breve sintesi dei vari parametri che caratterizzano i sensori (raccolti sinteticamente per i diversi satelliti all'interno della Tabella 1):

- λ : lunghezza d'onda del segnale utilizzato dal sensore. Le microonde, come è stato detto, sono caratterizzate da una λ compresa tra 1 mm ed 1 m.
- **Frequenza**: frequenza del segnale utilizzato dal sensore. Le microonde sono caratterizzate da frequenza compresa tra 0,3 e 300 GHz.
- La frequenza f del segnale è legata alla sua lunghezza d'onda λ , tramite la relazione $f = c / \lambda$, in cui c è la velocità della luce, pari a 299.792,458 km/s.
- **Banda**: lo spettro elettromagnetico delle microonde è stato suddiviso convenzionalmente in più bande (Fig. 9), pertanto la banda in cui lavora un sensore è l'intervallo di frequenza (o lunghezza d'onda) in cui ricade la frequenza (o lunghezza d'onda) del segnale utilizzato.
- **Polarizzazione**: i segnali radar possono essere emessi e ricevuti con differente polarizzazione: *Like-Polarized*: HH o VV; *Cross-Polarized*: HV o VH. La polarizzazione è l'orientamento del vettore campo elettrico dell'onda elettromagnetica (H indica il piano orizzontale e V quello verticale). La prima lettera indica la polarizzazione del segnale emesso e la seconda quella del segnale ricevuto.
- **Tempo di rivisitazione** o *repeat cycle*: tempo che intercorre tra due passaggi successivi del sensore sulla stessa area, seguendo la stessa orbita nominale. La riduzione del *repeat cycle* provoca una diminuzione degli effetti di decorrelazione indotti dalle variazioni delle proprietà elettromagnetiche degli oggetti che si verificano nel tempo che intercorre tra le acquisizioni (cfr. 2.3.1). Per alcuni sistemi molto flessibili è possibile acquisire dati sul sito di interesse con una frequenza più elevata di quella derivante dal *repeat cycle*, sfruttando la capacità del fascio del radar di potere essere orientato. Il cambiamento dell'inclinazione del fascio comporta tuttavia alcune variazioni delle caratteristiche geometriche di acquisizione delle immagini.
- **Intervallo di operatività**: intervallo di tempo in cui il sensore ha acquisito immagini SAR. All'interno di questo periodo non sempre le immagini possiedono caratteristiche adatte a essere elaborate con l'interferometria, dunque, nelle descrizioni che seguono si farà riferimento ad un intervallo più breve, in cui il sensore ha acquisito immagini utilizzabili per scopi interferometrici.
- **Orbita**: le orbite dei satelliti utilizzati per l'osservazione della terra, sono polari eliosincrone (sincrone con il Sole; passano sulla stessa zona della Terra sempre alla stessa ora) ed inclinate di circa 9° rispetto ai meridiani nel loro passaggio attraverso il piano equatoriale. L'inclinazione rispetto ai meridiani aumenta con la latitudine a causa della sfericità della Terra e raggiunge l'ortogonalità in corrispondenza dei poli. Alle latitudini di circa 40°N, l'inclinazione delle orbite rispetto ai meridiani è approssimativamente pari a 14°. La quota dell'orbita influisce sul tempo necessario al satellite per ritornare sulla stessa zona (tempo di rivisitazione), infatti, a parità di altre caratteristiche di acquisizione, maggiore è la quota dell'orbita minore è il tempo di rivisitazione.
- **Angolo di off-nadir** o **angolo di vista** (θ). Angolo formato dalla congiungente sensore-bersaglio (LOS) e la verticale.
- **Swath width**: larghezza dell'area indagata a terra, misurata in direzione perpendicolare a quella di avanzamento del sensore.
- **Risoluzione**: dimensione al suolo del *pixel* che compone l'immagine. Si distinguono la risoluzione in *range* (in direzione di propagazione del segnale trasmesso dall'antenna) e quella in *azimuth* (parallelamente alla direzione di moto della piattaforma su cui è posto il sensore). La proiezione sul terreno della risoluzione in *range* è la risoluzione in *ground range* (Fig. 2).

Tabella 1 - Principali caratteristiche operative dei sensori radar relativi alle missioni satellitari più rilevanti. I colori con cui sono rappresentati i diversi satelliti differenziano le bande di appartenenza dei segnali utilizzati dai relativi sensori.

Satellite	λ	Freq.	Banda	Polarizzazione	Repeat Cycle	Intervallo SAR		Quota	θ	Swath	Risoluzione			Agenzia & Nazionalità
	[cm]	[GHz]				Inizio*	Fine**				Range	Azimuth		
													[m]	
ERS-1	5,66	5,3	C	VV	35	1991	2000	785	23	100	8	4	ESA Europa	
ERS-2	5,66	5,3	C	VV	35	1995	2001***	785	23	100	8	4	ESA Europa	
ENVISAT	5,63	5,331	C	HH, VV, VH, HV	35	2002	(2010)	800	15-45	100	9	6	ESA Europa	
RADARSAT-1	5,6	5,3	C	HH	24	1995****	(2000)	805	10-60	45-500	8-100	8-100	CSA/USA Canada	
RADARSAT-2	5,5	5,405	C	HH, VV, VH, HV	24	2007	(2014)	800	10-60	20-500	3-100	3-100	CSA/USA Canada	
JERS-1	23,5	1,27	L	HH	44	1992	1998	568	35	75	18	18	NASDA Giappone	
ALOS	23,5	1,27	L	HH, VV, VH, HV	46	2006	(2010)	691	10-60	20-350	10-100	10-100	NASDA Giappone	
TerraSAR-X	3,1	9,6	X	HH, VV, VH, HV	11	2007	(2012)	514	15-60	10-100	1-4	1-16	DLR/ITD Germania	
TanDEM-X	3,1	9,6	X	HH, VV, VH, HV	11	2010	(2015)	514	15-60	10-100	1-4	1-16	DLR/ITD Germania	
COSMO-SkyMed	3,1	9,6	X	HH, VV, VH, HV	16	1: 2007 2: 2007 3: 2008 4: 2010	(2016)	619	20-50	10-200	1-100	1-100	ASI Italia	

* Se il satellite non è ancora stato lanciato, viene indicata la data prevista per il lancio. Esempio: (2008).

** Se il satellite è ancora in orbita viene indicata la fine prevista. Esempio: (2009).

*** ERS-2 è ancora in orbita, tuttavia, nel 2001 ha riportato danni al giroscopio che hanno compromesso l'utilizzabilità delle sue immagini ai fini interferometrici.

**** L'archivio di immagini SAR sull'Italia è disponibile a partire dal 2003.

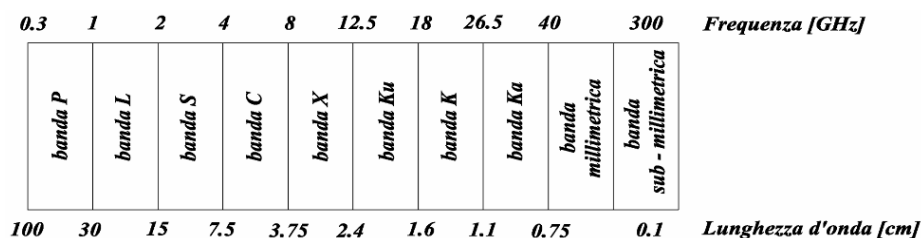


Fig. 9 - Spettro elettromagnetico delle microonde (Cigna, 2007).

Di seguito è riportata una breve descrizione delle caratteristiche operative dei principali sistemi SAR civili, montati su piattaforma satellitare, presenti in passato o attualmente operativi, con i dati dei quali (siano essi di archivio o provenienti dalle acquisizioni future) è possibile effettuare delle analisi interferometriche per la misura delle deformazioni del terreno. Le missioni sono state divise sulla base della banda di acquisizione e, per ciascuna banda, se ne descrivono le principali caratteristiche. Nella Fig. 10 è rappresentata la distribuzione temporale complessiva dei dati forniti da tali sensori. I loro parametri tecnici sono raccolti in Tabella 1. Si rimanda ai siti internet delle agenzie spaziali di competenza, sia per maggiori dettagli tecnici sulle missioni di seguito descritte, sia per le principali caratteristiche delle missioni SAR di breve durata e progettate per specifiche applicazioni (quali SEASAT, SIR-C/X-SAR e SRTM).

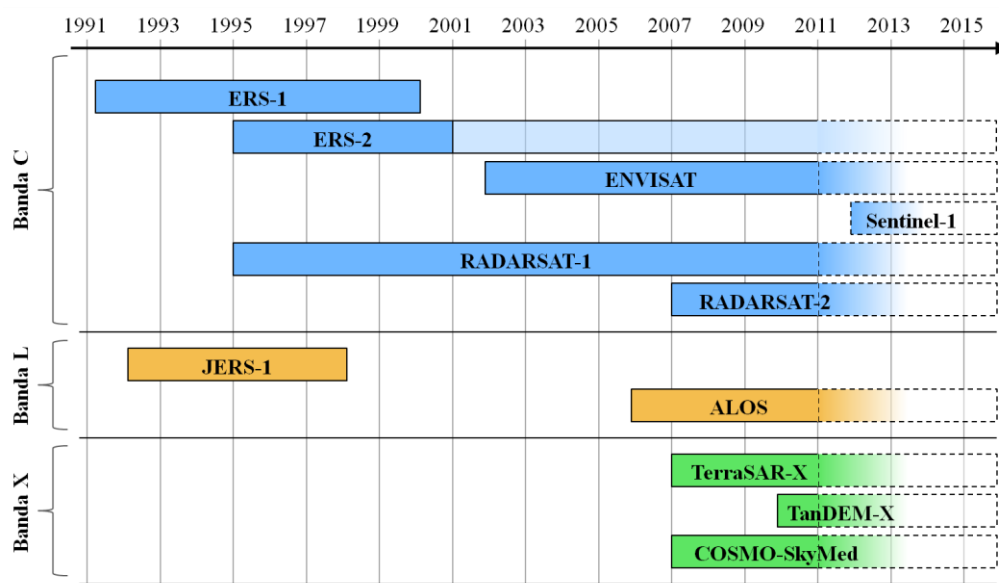


Fig. 10 - Dati SAR satellitari attualmente disponibili per effettuare analisi interferometriche. I colori con cui sono rappresentati i diversi satelliti differenziano le bande di appartenenza dei segnali utilizzati dai relativi sensori: banda C (azzurro), banda L (arancione) e banda X (verde).

In generale, le analisi interferometriche vengono portate avanti su immagini acquisite dallo stesso sensore o acquisite da sensori di identiche caratteristiche tecniche (per esempio i sensori montati sui satelliti ERS-1 ed ERS-2). I dati provenienti da sensori satellitari differenti non possono infatti essere usati in modo congiunto a causa delle diverse caratteristiche di acquisizione dei sensori, tra le quali la loro diversa polarizzazione, la banda utilizzata, l'orientazione spaziale della linea di vista. Soltanto in particolari casi ed attraverso alcuni accorgimenti, è possibile sfruttare immagini acquisite da sensori differenti, per esempio immagini ERS ed ENVISAT (in modalità *ERS-like*) per effettuare analisi interferometriche convenzionali (Arnaud et al., 2003) o analisi multi-interferogramma (Wegmuller et al., 2005).

2.2.1 Dati SAR in banda C

La maggior parte dei satelliti operativi fino a poco tempo fa, utilizzava sensori SAR che acquisivano in banda C. La frequenza del segnale utilizzato in questa banda è compresa tra 4 e 8 GHz e, di conseguenza, la lunghezza d'onda varia tra 7,5 e 3,75 cm rispettivamente.

I principali satelliti civili dotati di sensore SAR in banda C sono:

- **ERS-1** ed **ERS-2** (ESA)
- **ENVISAT** (ESA)
- **RADARSAT-1** e **RADARSAT-2** (CSA)

ERS-1 ed ERS-2

I satelliti ERS (*European Remote Sensing*) dell'ESA, sono stati dotati di sensori radar di tipo SAR in banda C (frequenza di 5,3 GHz, lunghezza d'onda $\lambda = 5,66$ cm) ed utilizzano polarizzazione VV⁴ (Tabella 1). Le loro orbite (Fig. 11) sono eliosincrone e lievemente inclinate rispetto ai meridiani (8,5°) ed illuminano, dalla quota di 785 km, una striscia di territorio (*swath*) larga approssimativamente 100 km. La direzione della congiungente sensore-bersaglio (LOS) è perpendicolare all'orbita del satellite ed è inclinata mediamente di un angolo pari a 23° (θ , *off-nadir*) rispetto alla verticale (Fig. 11). La risoluzione ottenuta è di circa 4 metri in *azimuth* e 8 metri in direzione di *range* (la risoluzione in *ground range* è circa 20 m). La stessa orbita nominale è ripercorsa ogni 35 giorni e in un tempo di circa 100 minuti.

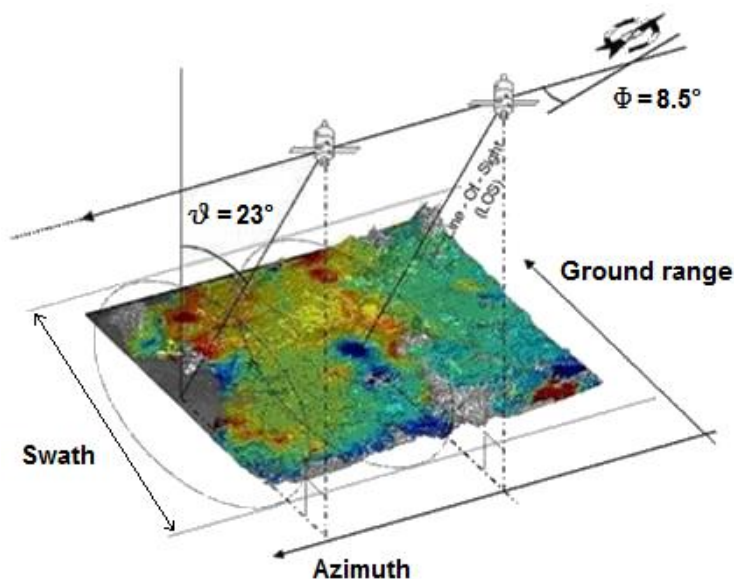


Fig. 11 - Geometria di acquisizione dei satelliti ERS (Colesanti et al., 2003a).

Il satellite ERS-1 ha acquisito dati dalla fine del 1991 a Marzo 2000. Da Novembre del 1993 ad Aprile 1995 le acquisizioni sono state caratterizzate da particolari fasi di durata di alcuni mesi ciascuna, in cui i parametri di acquisizione sono stati modificati per particolari applicazioni e per l'acquisizione in aree specifiche della Terra, tra le quali gli oceani e i poli.

Il satellite ERS-2 è operativo dall'inizio del 1995 e, fino al termine della missione ERS-1, ha eseguito una scansione della stessa scena ma da un punto di ripresa leggermente differente ed un giorno dopo il passaggio di ERS-1. Grazie a tale caratteristica, l'ESA ha garantito la disponibilità di coppie *Tandem* da Marzo 1995 a Marzo 2000, mediante le quali poter generare

⁴ Le immagini acquisite dai satelliti ERS-1 ed ERS-2 possono essere elaborate congiuntamente per mezzo dell'interferometria perché il sensore che è stato montato a bordo delle due piattaforme è identico.

dei DEM ad alta risoluzione sfruttando la *baseline* spaziale delle coppie di immagini. Il 16 Gennaio 2001 è avvenuta la rottura di un giroscopio del satellite ERS-2. Tale problematica, sebbene permetta l'acquisizione delle immagini radar e l'utilizzo del loro contenuto di ampiezza, non garantisce l'utilizzo dei dati a fini interferometrici, provocando uno *shift* di fase che riduce la banda di frequenza comune tra le diverse acquisizioni.

Grazie alla scelta dell'ESA di acquisire continuamente i dati a partire dal 1992, per vaste aree sono oggi disponibili i *dataset* storici che ricoprono un intervallo di circa dieci anni, composti da un'immagine radar ogni 35 giorni. Nella Fig. 7 sono mostrate tutte le immagini ERS riprese sull'Italia lungo passaggi satellitari discendenti ed ascendenti. Il territorio viene coperto da 113 immagini SAR ascendenti e 117 immagini discendenti. Mediamente, ciascuna zona possiede circa 40 immagini acquisite in geometria ascendente e 70 in geometria discendente.

ENVISAT

Il satellite ENVISAT (*ENVironmental SATellite*) dell'ESA, lanciato nel Novembre del 2002, ha recentemente sostituito e ampliato le funzioni dei satelliti ERS-1 ed ERS-2 (Tabella 1). Esso è dotato di un sensore ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), che rappresenta un'evoluzione del SAR e usa una serie di antenne che possono lavorare con diverse polarizzazioni e 7 diversi angoli di incidenza (compresi tra 15° e 45°) con conseguente variazione della dimensione della scena osservata in una singola immagine. Il satellite percorre un'orbita eliosincrona con tempo di rivisitazione uguale a quello dei satelliti ERS (35 giorni), ma con un ritardo di 30 minuti.

Lo strumento acquisisce in banda C (frequenza di 5,331 GHz e lunghezza d'onda di 5,63 cm) ma con un leggero *shift* nella frequenza rispetto ERS-1 ed ERS-2 che rende difficoltosa, ma possibile attraverso alcuni accorgimenti tecnici, la combinazione dei suoi dati con quelli ERS per effettuare elaborazioni interferometriche.

RADARSAT-1 e RADARSAT-2

Il satellite RADARSAT-1 della CSA, lanciato nel Novembre del 1995, utilizza un sensore SAR in banda C e polarizzazione HH (Tabella 1). La geometria di osservazione è molto flessibile, infatti, gli angoli di incidenza variano circa da 10° a 60° , il fascio d'onde radar può essere orientato e l'ampiezza delle bande di formazione dell'immagine possono essere variate da 45 a 510 km di larghezza, con le risoluzioni rispettivamente da 8 a 100 metri. Benché il ciclo di ripetizione di orbita del satellite sia di 24 giorni, la flessibilità del fascio orientabile del radar fornisce a RADARSAT-1 la capacità di acquisire immagini molto più frequentemente (per le regioni polari la copertura può essere quotidiana e alle latitudini equatoriali può essere ottenuta in 6 giorni usando la modalità *scanSAR Wide*, caratterizzata da *swath width* di 500 km; Fig. 12).

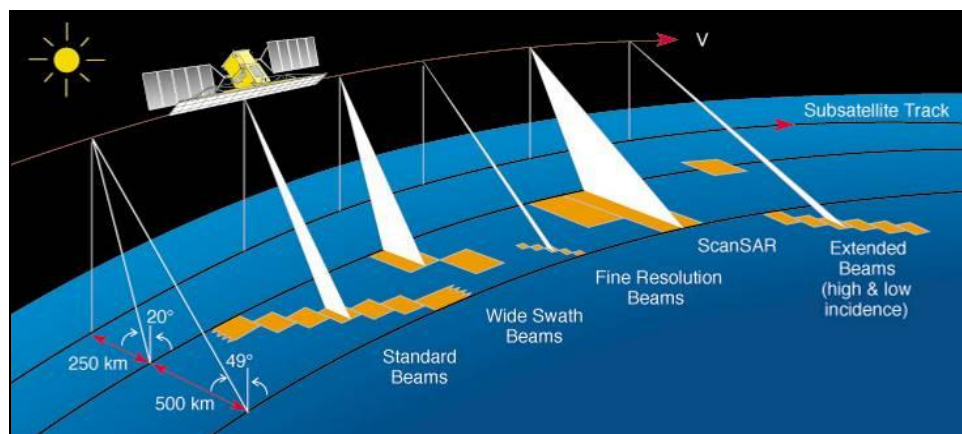


Fig. 12 - Modalità di acquisizione del satellite RADARSAT-1 (<http://www.space.gc.ca>).

A differenza degli altri satelliti, RADARSAT-1 acquisisce generalmente *on demand*; tuttavia, grazie ad un accordo tra RADARSAT *International* e TRE (società di *spin-off* del Politecnico di Milano), a partire da Marzo 2003 sono state acquisite immagini sul territorio italiano ogni 24 giorni in modalità *Standard*, sia lungo orbite ascendenti che discendenti. In aggiunta sono state richieste delle acquisizioni del satellite in modalità *Fine Beam* su alcune aree sensibili, quali Venezia, Torino, Roma, Napoli, Ancona e Crotone. Ad oggi, la maggior parte delle zone, risultano coperte da almeno 60 immagini RADARSAT-1 in geometria discendente e 60 in ascendente. Tali immagini, grazie all'elevato numero di acquisizioni disponibili e alla più breve frequenza di acquisizione (24 giorni) rispetto ai satelliti ERS ed ENVISAT (35 giorni) permettono di ottenere una precisione più elevata nella misura delle deformazioni, perché consentono di limitare gli effetti di decorrelazione temporale del segnale radar (cfr. 2.3.1).

A Dicembre del 2007 è stato lanciato anche il satellite RADARSAT-2, che rimarrà in orbita per circa 7 anni (Tabella 1). L'orbita è la stessa di RADARSAT-1, ma è percorsa con un ritardo di 30 minuti per permettere le applicazioni interferometriche durante il periodo in cui i due satelliti saranno entrambi operativi. Il satellite acquisisce dati in banda C, con un leggero *shift* nella frequenza centrale rispetto a quella di RADARSAT-1. La missione, permettendo tutte le modalità di acquisizione di RADARSAT-1, garantirà per il futuro una certa continuità con i dati ottenibili dal satellite precedente. Le sue novità principali sono invece legate alle diverse angolazioni con cui il sistema può operare che permettono di arrivare fino a una risoluzione di 3 m, sia in *range* che in *azimuth*, di acquisire immagini da entrambi i lati della piattaforma rispetto alla direzione di volo (*dual-sided imaging*), e di emettere e acquisire il segnale in tutte le polarizzazioni.

2.2.2 Dati SAR in banda L

La frequenza del segnale utilizzato nella banda L è compresa tra 1 e 2 GHz e, di conseguenza, la lunghezza d'onda varia tra 30 e 15 cm rispettivamente. Le sperimentazioni condotte su alcune aree di prova, scelte in modo da rappresentare vari tipi di movimento, velocità di deformazione e ambiente geologico, hanno dimostrato che l'uso di dati radar in banda L, riduce gli effetti di decorrelazione temporale (cfr. 2.3.1) indotti dalla copertura vegetale e dalle alte velocità di deformazione (Strozzi et al., 2005).

La componente della decorrelazione dovuta alle variazioni della copertura vegetale di coppie di immagini SAR in banda L è più bassa rispetto a quella in banda C, perché la banda L è caratterizzata da lunghezza d'onda più elevata (quindi da frequenza più bassa) e di conseguenza il segnale ha una maggiore capacità di penetrazione. L'uso di una maggiore lunghezza d'onda permette inoltre di ridurre i problemi legati all'ambiguità di fase (cfr. 2.3), infatti, se si opera in banda L, il valore di $\lambda/2$ è 11,75 cm ($\lambda_{\text{JERS}}=23,5$ cm) e quindi aumenta la probabilità che tra due acquisizioni successive gli spostamenti che si verificano all'interno dell'area di studio non superino tale valore limite (se si opera in banda C il limite è 2,83 cm).

I principali satelliti civili dotati di sensore SAR in banda L sono:

- **JERS-1** (NASDA)
- **ALOS** (JAXA, JAROS)

JERS-1

Il satellite JERS-1 (*Japanese Earth Resources Satellite-1*) della NASDA ha operato dal 1992 al 1998 fornendo una grande quantità di dati SAR con *repeat cycle* di 44 giorni, risoluzione spaziale di 18 m e larghezza di ogni strisciata di circa 75 km (Tabella 1). Il sensore ha acquisito in polarizzazione HH e con angolo di vista inclinato di 35° rispetto alla verticale. Nonostante i notevoli pregi associati alle immagini acquisite in banda L, l'applicazione dell'interferometria alle immagini JERS genera alcuni problemi. Il rapporto tra segnale e rumore è molto basso e gli errori che si ottengono nelle mappe di spostamento sono dell'ordine dei centimetri. A ciò si aggiunge la difficoltà nel calcolo dell'ubicazione dell'orbita e quindi della *baseline* tra due orbite successive. Tali problemi vengono in parte risolti dal nuovo sensore ALOS-PALSAR.

ALOS

Nel Febbraio del 2006 l'agenzia spaziale giapponese (JAXA) e la *Japan Resources Observation System Organization* (JAROS) hanno messo in orbita ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), un satellite dotato di sensore radar PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) che lavora in banda L (1,27 GHz) con diversi angoli di vista, da 10 a 60° (Tabella 1). La risoluzione spaziale ottenuta è compresa tra 10 e 100 m, e l'area illuminata è compresa tra 20 e 350 km in relazione all'angolo di vista impiegato. Il ciclo di ripetizione è di 46 giorni, ma esiste la possibilità di avere dei sotto-cicli di 2 giorni. La durata della missione dovrebbe essere compresa tra 3 e 5 anni. Purtroppo il programma di acquisizioni del satellite prevede che il territorio italiano venga coperto nel tempo da un numero limitato di acquisizioni. Questa copertura temporale dovrebbe garantire la possibilità di implementare analisi interferometriche differenziali, ma non elaborazioni multi-interferogramma.

2.2.3 Dati SAR in banda X

La frequenza del segnale utilizzato nella banda X è compresa tra 8 e 12,5 GHz e, di conseguenza, la lunghezza d'onda varia tra 3,75 e 2,4 cm rispettivamente.

Le immagini SAR acquisite in banda X possiedono, al contrario di quelle in banda L, maggiori difficoltà di acquisizione in aree vegetate rispetto alla banda C, a causa della minore lunghezza d'onda utilizzata (2,4-3,75 cm per la banda X, contro 3,75-7,5 cm per la banda C). Tuttavia, i sistemi che operano in banda X sono stati progettati in modo da acquisire immagini su una stessa area con tempo di rivisitazione più ridotto, diminuendo quindi i fenomeni di decorrelazione temporale e consentendo di controllare fenomeni caratterizzati da velocità più elevate. La lunghezza d'onda più ridotta consente inoltre di ottenere una precisione maggiore nella stima delle deformazioni (calcolate come frazioni di λ).

L'uso di una minore lunghezza d'onda, accentua i problemi legati all'ambiguità di fase (cfr. 2.3), infatti, essendo minore il valore della semilunghezza d'onda relativa alla banda X rispetto a quella della banda C ($\lambda = 1,55$ cm, invece di 2,83 cm), è maggiore la probabilità che le deformazioni che si verificano nell'intervallo di tempo che intercorre tra le acquisizioni superino tale valore.

I principali satelliti civili dotati di sensore SAR in banda L sono:

- **TerraSAR-X e TanDEM-X** (DLR)
- **COSMO-SkyMed** (ASI)

TerraSAR-X e TanDEM-X

Il *German Aerospace Center* (DLR) ha messo in orbita nel Giugno del 2007 il satellite TerraSAR-X, dotato di sensore SAR in banda X, con $\lambda = 3,1$ cm e frequenza di 9,6 GHz (Tabella 1). Il sensore può lavorare con diverse polarizzazioni ed ha un *repeat cycle* di 11 giorni. Il satellite fornisce immagini a elevata risoluzione (da 1 a 3 m nella configurazione *SpotLight*), ha la possibilità di variare l'angolo di osservazione tra 15° e 60° e può ritornare sulla stessa area con un tempo inferiore o uguale a 2 giorni, caratteristica molto utile per l'osservazione di fenomeni caratterizzati da tassi di movimento rapidi.

Il 21 Giugno 2010 è stato lanciato TanDEM-X (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement*), gemello di TerraSAR-X. I due satelliti acquisiranno in modalità *tandem* l'intera superficie terrestre e consentiranno la creazione di un modello digitale del terreno (DSM, *Digital Surface Model*) ad elevata risoluzione. Il DSM avrà risoluzione spaziale di 12 metri e risoluzione inferiore ai 2 metri.

COSMO-SkyMed

L'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) ed alcune società del Gruppo Finmeccanica come Telespazio ed Alenia Spazio, in collaborazione con il Ministero della Difesa, stanno portando avanti il programma COSMO-SkyMed, *Constellation of Small Satellites for the Mediterranean basin Observation* (Tabella 1). Si tratta di una costellazione di quattro satelliti per

l'osservazione della Terra, per applicazione duale, civile e militare. Ciascuno dei quattro satelliti sarà dotato di sensori SAR in banda X e *repeat cycle* di 16 giorni. Il sistema sarà caratterizzato da elevata flessibilità di acquisizione e, in condizioni di emergenza, sarà possibile ritornare su una stessa area con un tempo inferiore od uguale a 12 ore, caratteristica molto utile per l'osservazione di fenomeni caratterizzati da tassi di movimento rapidi.

La costellazione è stata realizzata gradualmente, infatti, i primi due satelliti sono stati messi in orbita nel 2007, il terzo nel 2008, e l'ultimo è stato lanciato a Novembre 2010. L'uso della costellazione COSMO-SkyMed permette di ridurre i tempi tra due acquisizioni successive relative alla stessa area, grazie al *repeat cycle* di ogni satellite e alla possibilità di acquisire su una stessa area mediante i diversi satelliti della costellazione. L'uso combinato dei 4 satelliti potrà infatti permettere di ottenere certamente una frequenza di rivisitazione più elevata.



Fig. 13 - Alcune tra le prime immagini dei satelliti COSMO-SkyMed: sommità del Monte Etna (1 m di risoluzione) e Delta del Po (5 m di risoluzione) [<http://www.asi.it/>].

2.3 Interferometria SAR (InSAR)

La tecnica convenzionale per estrarre informazioni sulle deformazioni del terreno a partire da dati radar è l'interferometria differenziale (DInSAR, *Differential SAR Interferometry*). Questa tecnica si basa sull'analisi della variazione di fase riscontrabile nel confronto di una coppia di immagini radar acquisite sulla stessa area ma in due momenti differenti, in modo da mettere in luce eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione avvenuti tra le due acquisizioni, topografia o disturbi atmosferici (Massonnet & Feigl, 1998, Rosen et al., 2000).

Le immagini SAR per applicazioni interferometriche vengono elaborate in modo da preservare, per ogni *pixel*, le informazioni sia di ampiezza che di fase dell'eco ricevuto. L'ampiezza individua la parte di campo elettromagnetico incidente su tutti gli oggetti appartenenti alla cella di risoluzione a terra e retrodiffusa verso il sensore (cfr. 2.1.3). I valori di fase delle immagini SAR costituiscono invece l'informazione di base per tutte le tecniche interferometriche, poiché racchiudono informazioni sul doppio percorso sensore-bersaglio compiuto dal segnale.

Il termine di fase di un'immagine SAR è infatti dato dal contributo di molteplici termini che possono essere riassunti nella seguente equazione:

$$\phi = \psi + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r + \alpha + n \quad (1)$$

in cui ψ è il termine di fase dovuto alla riflettività del bersaglio, α è un contributo dovuto all'atmosfera, r è la distanza sensore-bersaglio ed n è un inevitabile rumore proprio del sistema di acquisizione, legato alla curvatura terrestre, al rapporto segnale-rumore (SNR, *Signal-Noise*

Ratio) ed al rumore strumentale. Il fattore $4\pi/\lambda \cdot r$ viene indicato con il termine di propagatore (Ferretti et al., 2003).

L'obiettivo dell'interferometria è di isolare i contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e di stimare 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 è tuttavia inutilizzabile perché risulta impossibile discriminare i vari contributi a causa della casualità dei termini legati ai retrodiffusori presenti nella scena e all'elevata entità del termine propagatore. Tuttavia, nell'ipotesi che, nel tempo intercorso tra l'acquisizione di due immagini SAR, le caratteristiche di retrodiffusione degli oggetti presenti nella scena siano rimaste immutate, si può considerare la differenza della fase fra due immagini relative alla stessa area, i contributi dovuti alla riflettività si elidono e la fase dell'interferogramma dipende, con buona approssimazione, solo dalla distanza sensore-bersaglio (a parte i contributi spuri dovuti all'atmosfera e al rumore)⁵:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (2)$$

in cui Δr è la distanza in *range* dei percorsi tra i sensori e la stessa cella di risoluzione a terra e λ è la lunghezza d'onda del segnale radar utilizzato per effettuare l'acquisizione delle immagini.

La differenza di fase, *pixel a pixel*, fra due immagini SAR è detta *fase interferometrica*. Essa può assumere valori compresi tra $-\pi$ e $+\pi$ e viene rappresentata nell'immagine di fase mediante le frange di interferenza che in genere vengono evidenziate tramite una progressione di colore verde-giallo-rosso-blu (Fig. 14).

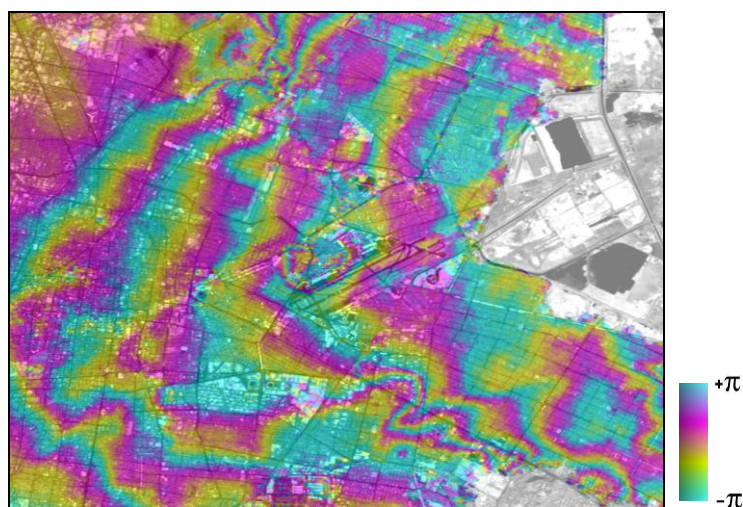


Fig. 14 - Frange di interferenza, rappresentate mediante progressione verde-giallo-viola-blu (<http://www.geodesy.miami.edu/subsidence.html>).

Nel caso in cui le immagini siano acquisite da posizioni e in tempi differenti, fra le due acquisizioni SAR è presente sia una *baseline* spaziale che temporale e, di conseguenza, la fase interferometrica possiede una componente legata all'elevazione del terreno oltre a quella data da eventuali deformazioni verificatesi nell'intervallo di tempo che intercorre tra le due acquisizioni. Questo caso è il più frequente nel momento in cui le immagini della coppia interferometrica provengono da piattaforme satellitari.

⁵ In realtà il termine $\Delta\psi$ non può essere considerato nullo se gli angoli di vista variano eccessivamente o l'intervallo temporale tra le due acquisizioni è troppo elevato e, il termine $\Delta\alpha$, è nullo soltanto per immagini acquisite simultaneamente.

In questa modalità, la fase interferometrica è data dalla somma di un contributo legato alla topografia ed uno legato alle deformazioni del terreno, oltre che dai termini legati al rumore ed all'atmosfera:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{top} + \Delta\varphi_{def} + \Delta\varphi_{rum} + \Delta\varphi_{atm} \quad (3)$$

Per lo studio delle deformazioni è dunque necessario isolare il contributo relativo alle deformazioni del terreno, sottraendo alla fase interferometrica la fase legata alla topografia e ottenendo la fase interferometrica differenziale:

$$\Delta\varphi_{diff} = \Delta\varphi - \Delta\varphi_{top} = \Delta\varphi_{def} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{rum} \quad (4)$$

Per effettuare tale sottrazione sono disponibili i metodi della *Three Pass Interferometry* o il *DTM Elimination Method* (Massonnet & Feigl, 1998).

Le misure di fase ottenute mediante le precedenti fasi, sono affette da ambiguità. I valori di fase infatti sono misurati a meno di multipli interi di 2π , ognuno corrispondente ad un intero ciclo di fase e variazioni di *range* che differiscono di $\lambda/2$ (valore di deformazione corrispondente ad un ciclo completo di fase, 2π), mostrano stesse variazioni fase. Questa circostanza è visibile dall'immagine di fase interferometrica che mostra la presenza di numerose frange, cioè salti di 2π tra *pixel* vicini.

Nelle analisi interferometriche su immagini satellitari, il problema dell'ambiguità spesso è particolarmente accentuato perché non è possibile disporre di una cadenza temporale di misure adeguata e le deformazioni che si verificano nell'intervallo temporale tra le due acquisizioni superano il valore $\lambda/2$ (che nel caso dei satelliti ERS vale 2,8 cm).

Per risolvere l'ambiguità di fase è necessario effettuare il *phase unwrapping* (Fig. 15 e Fig. 16), ossia lo srotolamento della fase, utilizzando uno dei numerosi algoritmi sviluppati negli ultimi anni (Ghiglia et al., 1987; Ghiglia & Romero, 1994; Fornaro et al., 1996; Pritt, 1996).

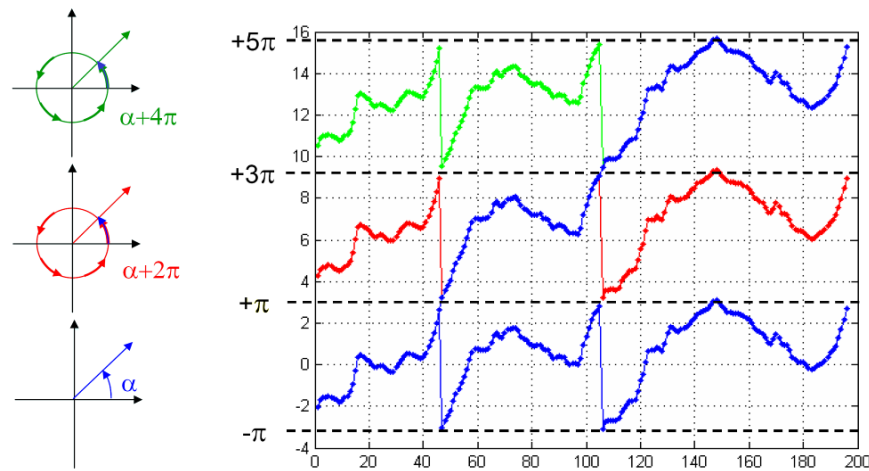


Fig. 15 - *Phase unwrapping monodimensionale* (TRE, 2008b).

Uno dei principali rischi nell'applicazione di questi algoritmi è legato all'equivocazione della fase. L'interferometria SAR consente infatti di valutare con accuratezza millimetrica solo variazioni di distanza sensore-bersaglio pari a una frazione della lunghezza d'onda, ma eventuali "salti" di diversi centimetri vengono equivocati, a meno che la deformazione non interessi un certo numero di *pixel* adiacenti e caratterizzati da distribuzione regolare. Al limite, se un *pixel* isolato si muovesse esattamente di mezza lunghezza d'onda (2,8 cm per i satelliti ERS) non risulterebbe possibile misurare alcuna variazione di fase rispetto al caso di bersaglio fermo. Questo non significa che non sia possibile misurare spostamenti maggiori di mezza lunghezza d'onda, ma solo che per misurarli è necessario che tra *pixel* adiacenti non si verifichi uno spostamento superiore a $\lambda/2$.

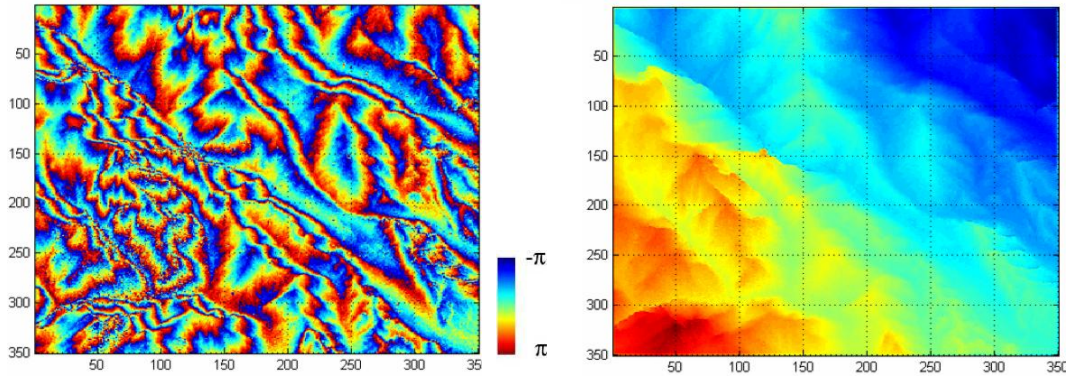


Fig. 16 - Esempio di immagine di fase prima e dopo il *phase unwrapping* (TRE, 2008b).

La mappa delle deformazioni nella direzione LOS è ricavata applicando all'immagine di fase srotolata, *pixel per pixel*, la relazione fondamentale dell'interferometria:

$$\Delta r = \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta \varphi_{unw} \quad (5)$$

in cui $\Delta \varphi_{unw}$ è la fase interferometrica srotolata e λ è la lunghezza d'onda del segnale impiegato.

Le deformazioni che possono essere quindi misurate sono dell'ordine delle lunghezze d'onda delle radiazioni utilizzate, tipicamente dal centimetro al millimetro, con precisioni pari a una piccola frazione delle stesse.

2.3.1 Decorrelazione (geometrica e temporale) e contributo atmosferico

La qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR può essere ridotta, o addirittura compromessa, dai fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica.

I fenomeni di decorrelazione temporale (*temporal decorrelation*), sono causati dalla variabilità delle proprietà elettromagnetiche dei bersagli radar tra le diverse acquisizioni. Tali variazioni sono molto accentuate in zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e dalle stagioni, e sono meno evidenti in corrispondenza dei centri urbani e delle rocce esposte che rimangono maggiormente stabili nel tempo. I fenomeni di decorrelazione temporale possono essere causati anche da eventi atmosferici, quali precipitazioni intense o neve, cicli di gelo e disgelo, o variazioni della copertura vegetale legate a incendi o deforestazioni. Se la *baseline* temporale è eccessiva, l'ipotesi che il contributo di fase ψ si elida generando l'interferogramma non è più verificata (cfr. 2.3).

I fenomeni di decorrelazione geometrica, sono causati dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini. Tale distanza è detta *baseline* normale o geometrica e si può dimostrare che, maggiore è il suo valore assoluto, minore è la banda comune tra i segnali delle due immagini e quindi minore è il rapporto segnale-rumore relativo all'interferogramma da esse generato (TRE, 2008).

Una misura della decorrelazione tra il segnale di due immagini è rappresentata dalla coerenza interferometrica, un indice della cross-correlazione locale fra le due immagini della coppia SAR.

Nella Fig. 17 è riportato un esempio dell'influenza dei fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica sulla qualità dell'interferogramma. L'interferogramma a) è stato ottenuto utilizzando due acquisizioni a distanza di 1 giorno e con *baseline* normale pari a 123 m. Grazie al limitato intervallo di tempo che separa le due immagini della coppia interferometrica, le condizioni della scena non mutano sensibilmente, infatti, l'interferogramma presenta una buona coerenza, ovvero sono pressoché assenti nell'immagine fenomeni di rumore. Le frange interferometriche sono ben visibili e sono legate essenzialmente alla componente topografica della zona campione. Nell'interferogramma b) l'intervallo temporale tra le due immagini della coppia interferometrica è pari a 1984 giorni, ma la componente di *baseline* normale è quasi

inalterata (149 m). In esso vengono registrati sensibili disturbi dovuti a decorrelazione temporale e la coerenza diminuisce rispetto al caso a). Nell'interferogramma c) i valori di *baseline* temporale e normale sono entrambi elevati e l'immagine appare completamente rumorosa e si perde completamente coerenza (TRE, 2008b).

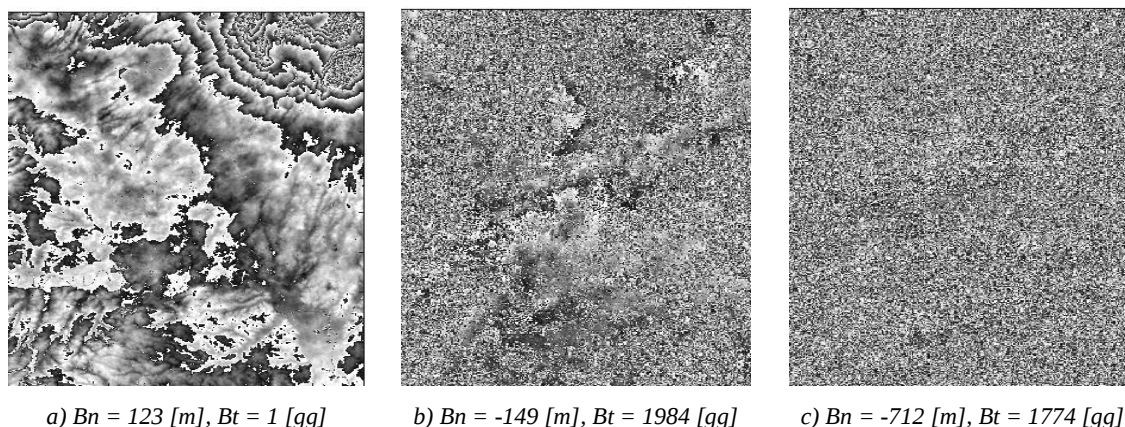


Fig. 17 - Interferogrammi e disturbi dovuti a decorrelazione temporale e geometrica (TRE, 2008b).

L'interpretazione dei dati interferometrici può essere ulteriormente complicata dalla variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni. Ciò si traduce nella presenza di un altro termine di fase, $\Delta\varphi_{atm}$, difficile da discriminare dal contributo relativo a eventuali movimenti. Tale termine, deriva da un ritardo nella propagazione del segnale, legato all'attraversamento della troposfera, all'interno della quale l'umidità, la temperatura e la pressione variano lentamente nello spazio, ma possono essere molto diversi durante le varie acquisizioni.

2.3.2 Potenzialità e limiti

I sensori radar installati a bordo di satelliti presentano il vantaggio di poter monitorare vaste porzioni di territorio senza entrare in contatto con esso e con costi da sostenere molto contenuti rispetto alle altre tecniche di monitoraggio delle deformazioni superficiali. Rispetto ai sistemi ottici, i sistemi radar operano con continuità, potendo acquisire dati in qualsiasi condizione atmosferica (anche in presenza di copertura nuvolosa), sia di giorno che di notte.

La disponibilità degli archivi di immagini costituiti dalle agenzie spaziali rappresenta una risorsa molto importante perché permette di avviare oggi analisi su fenomeni avvenuti nel passato (*back monitoring*). Tra gli archivi di immagini SAR satellitari più rilevanti, quelli ERS (1992-2001) ed ENVISAT (2002-oggi) e quello RADARSAT (2003-oggi) (cfr. 2.2).

Il livello di risoluzione delle immagini SAR satellitari restringe il campo di utilizzo della tecnica a fenomeni di grandi dimensioni. Tale condizione tuttavia rappresenta un vantaggio se si considera che il monitoraggio di grandi dissesti con tecniche tradizionali è spesso ostacolato dalla scarsa accessibilità dei siti, dai costi e i tempi che l'adozione di tali tecniche comportano.

L'interferometria differenziale permette di stimare le deformazioni della superficie indagata con sensibilità comparabile a frazioni della lunghezza d'onda impiegata, pertanto, lavorando nel campo delle microonde, con sensibilità dell'ordine del centimetro.

Un difetto dei sistemi radar satellitari è dovuto alla loro particolare geometria di acquisizione che comporta la presenza nelle immagini di alcune deformazioni prospettiche che rendono difficoltosa o, alle volte impraticabile, la stima delle deformazioni. A ciò si aggiungono i diversi effetti di decorrelazione (cfr. 2.3.1) che compromettono la qualità dei risultati dell'analisi e il limite legato alla capacità della tecnica di potere calcolare la deformazione soltanto lungo la linea di vista del sensore. L'interferometria SAR tradizionale inoltre non consente di effettuare stime puntuali, ma solo analisi d'insieme per identificare fenomeni macroscopici in atto.

Molti oggetti a terra, pur con caratteristiche di riflessione stabili nel tempo, modificano la propria risposta radar se osservati da direzioni molto diverse. Ciò comporta che, per applicare l'interferometria differenziale, siano utilizzabili solo coppie di immagini SAR con *baseline* geometrica minore di alcune centinaia di metri.

L'aumento della copertura vegetale riduce la penetrazione del segnale radar al suolo, tuttavia le lunghezze d'onda più elevate (banda L) hanno mostrato di avere una maggiore capacità di penetrazione della vegetazione, pertanto, gli interferogrammi generati con tali immagini sono meno affette dai fenomeni di decorrelazione legati ai cambiamenti della vegetazione. Per ridurre gli effetti di decorrelazione provocati dalla vegetazione sarebbe necessario disporre di sensori radar multi-banda, e sfruttare più lunghezze d'onda e frequenze per adattare il segnale radar al tipo di copertura.

Gli interferogrammi sono soggetti ad artefatti causati dalla variabilità spaziale e temporale della troposfera e spesso tali effetti non sono discriminabili dalle possibili deformazioni superficiali. L'utilizzo di due singole immagini per la generazione di un interferogramma non permette infatti di stimare e rimuovere la componente atmosferica della fase. Tale contributo risulta invece identificabile mediante analisi multi-interferogramma, sfruttando il comportamento spazio-temporale degli artefatti atmosferici. È stato osservato, infatti, che la componente atmosferica non è correlata nel tempo (diversi interferogrammi hanno diversi componenti atmosferici della fase), ma lo è nello spazio (punti vicini nell'immagine sono caratterizzati da simili contributi della fase dovuti ai ritardi atmosferici) (Ferretti et al., 2000b).

L'interferometria differenziale convenzionale non permette di distinguere la presenza delle diverse sorgenti di errore e quindi, una volta rimossa la componente topografica del segnale all'interno degli interferogrammi, non è possibile separare la componente di movimento dalle altre componenti della fase interferometrica (cfr. 2.3). Per tale ragione, le misure dello spostamento ottenute hanno generalmente un carattere qualitativo e sono attendibili solo nel caso in cui l'entità dello spostamento misurato sia tale da non confondersi con il rumore di fondo e gli artefatti atmosferici. Chiaramente, le informazioni sul campo deformativo provenienti da altra strumentazione, per esempio indicazioni sull'ubicazione di aree stabili, possono fornire un valido contributo per l'interpretazione dei risultati.

L'impossibilità di rimuovere la componente atmosferica dai singoli interferogrammi riduce dunque l'accuratezza delle misure DInSAR e limita le possibilità di ottenere misure attendibili soprattutto per fenomeni che hanno una frequenza spaziale paragonabile a quella dell'atmosfera e limitati tassi di deformazione, paragonabili alle differenze di fase indotte dai disturbi atmosferici. Tuttavia, nel caso dell'analisi di fenomeni con limitata estensione spaziale, come la maggioranza delle frane, il segnale indotto dal movimento è solitamente facile da distinguere da quello atmosferico, sia per la diversa distribuzione spaziale che per l'entità dei movimenti attesi.

Riassumendo, nella stima delle deformazioni del terreno la tecnica DInSAR satellitare presenta le seguenti caratteristiche:

Potenzialità:

- Monitorare il territorio senza entrarvi in contatto diretto;
- Operare con continuità (giorno e notte) e in qualunque condizione atmosferica;
- Effettuare *back monitoring* grazie agli archivi di immagini;
- Monitorare fenomeni di grandi dimensioni;
- Controllo di deformazioni con la precisione del centimetro;
- Possibilità di stimare le deformazioni in modo uniformemente distribuito nello spazio.

Limiti:

- Capacità di misurare la deformazione soltanto lungo la LOS;
- Presenza di deformazioni prospettiche nelle immagini;
- Effetti di decorrelazione spaziale e temporale;
- Presenza di disturbi legati all'atmosfera;
- Non è possibile eseguire stime puntuali, ma solo analisi areali;
- La copertura vegetale riduce la penetrazione del segnale al suolo.

2.4 Tecniche multi-interferogramma

Un'evoluzione dell'analisi interferometrica differenziale per lo studio delle deformazioni superficiali è costituita dalle tecniche interferometriche avanzate, le A-DInSAR (*Advanced DInSAR*) o *multi-pass Interferometry*, sviluppate a partire dagli anni '90. Queste tecniche permettono di superare alcuni dei limiti legati agli approcci più convenzionali dell'interferometria SAR, poiché consentono di contenere i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica e stimare i contributi di fase legati ai cambiamenti subiti dall'atmosfera tra le diverse acquisizioni.

Le tecniche A-DInSAR si basano su analisi di tipo multi-interferogramma o multi-immagine, cioè utilizzano una lunga serie di immagini radar relative a una stessa area, dalle quali vengono identificati alcuni bersagli radar, che sono utilizzati per la misura degli spostamenti (Fig. 18).

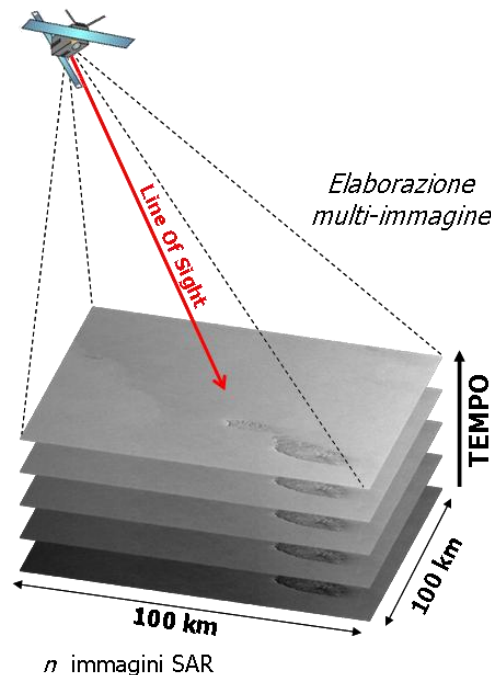


Fig. 18 - Principio di funzionamento delle tecniche multi-interferogramma o multi-passo.

A differenza della tecnica interferometrica differenziale, per la quale è necessario selezionare solo coppie di immagini caratterizzate da bassi valori di *baseline* spaziale ($< 200\text{-}300\text{ m}$) con la conseguente riduzione della frequenza di campionamento, l'utilizzo delle tecniche multi-interferogramma permette di selezionare quasi tutte le immagini SAR acquisite dal sensore prescelto sulla zona in esame. Infatti, per implementare un'analisi multi-interferogramma possono essere scelte anche immagini separate da *baseline* normale molto elevata (fino a 1200 m con immagini acquisite in banda C; Colesanti et al., 2003b), con conseguente miglioramento del campionamento temporale dei fenomeni.

Grazie alla disponibilità di grandi archivi di dati acquisiti dalle agenzie spaziali, tali tecniche permettono di ottenere migliori risultati di quelli ricavabili con analisi interferometriche convenzionali, sia per la qualità delle misure di deformazione ottenute (precisione millimetrica), sia per la capacità di seguire la loro evoluzione temporale. Infatti, mentre l'interferometria differenziale campiona il fenomeno di deformazione in esame tramite lo studio di due acquisizioni (la *master*, M, e la *slave*, S), stimando soltanto la deformazione cumulata avvenuta tra le due acquisizioni o, in modo equivalente, la velocità di deformazione lineare registrata tra esse, l'analisi multi-interferogramma è capace di fornire la descrizione completa dell'evoluzione temporale delle deformazioni (Fig. 19 e Fig. 20). Ovviamente, questa capacità è limitata dal numero e dalla distribuzione temporale delle acquisizioni disponibili.

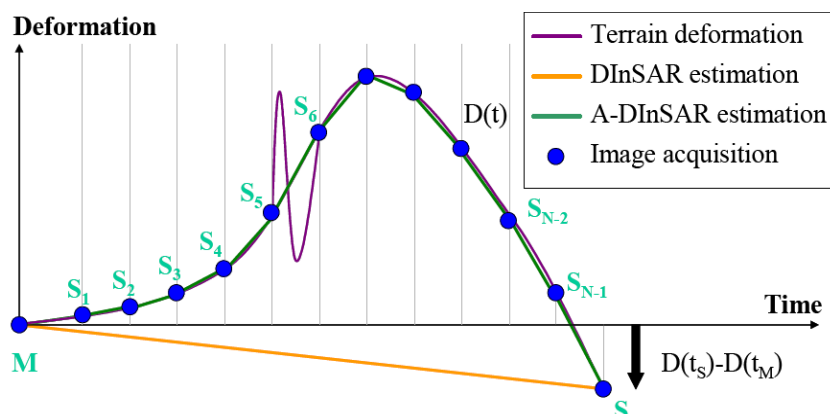


Fig. 19 - Campionamento temporale di un fenomeno deformativo ottenuto mediante analisi DInSAR e analisi multi-interferogramma. Benché le analisi A-DInSAR garantiscano un migliore campionamento temporale del fenomeno, il movimento occorso tra l'acquisizione S_5 e S_6 non può essere misurato con le immagini disponibili (Crosetto et al., 2005b).

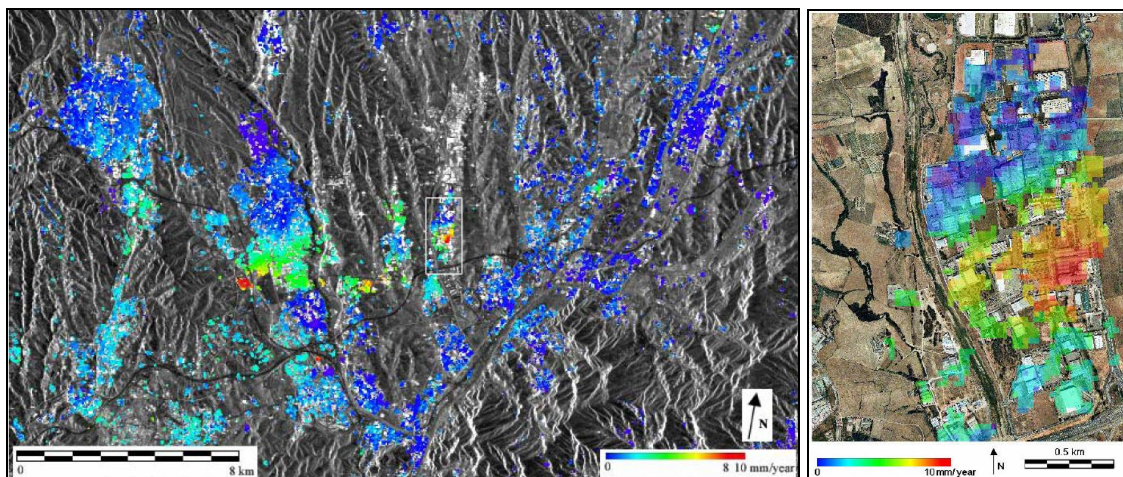


Fig. 20 - Esempio di analisi A-DInSAR: velocità medie di deformazione misurate mediante analisi di dati ERS1/2 1995-2000 (Crosetto et al., 2005b).

L'interferometria differenziale per coppie di immagini non permette di distinguere la presenza di diverse sorgenti di errore all'interno degli interferogrammi e quindi, una volta rimossa la componente topografica del segnale, di separare la componente di movimento dalle altre componenti della fase interferometrica. Per tale ragione, le misure dello spostamento ottenute con questa configurazione hanno generalmente un carattere qualitativo e sono attendibili solo nel caso in cui l'entità dello spostamento misurato sia tale da non confondersi con il rumore di fondo e gli artefatti atmosferici. Al contrario, mediante le tecniche multi-interferogramma è possibile estrarre dalle informazioni di fase i diversi contributi e, sfruttando la correlazione nello spazio del termine atmosferico e la sua decorrelazione nel tempo, è possibile rimuoverlo dalla fase interferometrica (Crosetto et al., 2005b).

Oltre al termine di fase interferometrica legato all'atmosfera, le tecniche multi-immagine consentono di rimuovere i contributi di fase residui legati alla topografia e dovuti ad esempio a errori presenti nella fase topografica simulata utilizzata per effettuare la fase di *phase flattening* (sottrazione topografica). La stima di tale componente è possibile grazie alla sua stretta dipendenza dai valori di *baseline* normale e risulta tanto più accurata, quanto più ampio è l'intervallo di *baseline* normali che caratterizza il *dataset* di immagini utilizzato. Utilizzando un *range* di *baseline* compreso tra ± 1200 m per acquisizioni in banda C, si può ottenere nella stima dell'errore topografico residuo una precisione minore di 1 m (Colesanti et al., 2003b).

Benché il campionamento spaziale delle immagini SAR satellitari sia regolare nello spazio, le tecniche interferometriche multi-immagine permettono di ricavare informazione su fenomeni deformativi soltanto su un ristretto numero di bersagli radar, caratterizzati da basse componenti di fase legate al rumore. Di conseguenza, l'abilità delle tecniche multi-interferogramma di descrivere i fenomeni di deformazione, dipende temporalmente dal numero e dalla distribuzione delle immagini disponibili sull'area in studio e, spazialmente, dalla disponibilità di “good pixels”, per esempio *pixel* affetti da bassi livelli di rumore nell'informazione di fase o *pixel* caratterizzati da stabilità nelle caratteristiche di riflessione durante l'intero periodo coperto dalle acquisizioni (Crosetto et al., 2005b).

In relazione al tipo di analisi e al numero di acquisizioni disponibili sull'area di interesse, le tecniche A-DInSAR possono permettere di ricavare da poche centinaia fino ad oltre 1.000 punti/km². Si può dunque immaginare la griglia di bersagli radar come una fitta rete di stazioni GPS naturali per il monitoraggio di vaste aree di interesse, con una frequenza di aggiornamento del dato pari a quella di acquisizione delle immagini (generalmente mensile) e con una densità spaziale di punti di misura estremamente elevata.

Il risultato di un'analisi A-DInSAR consiste in un database di bersagli radar per i quali le seguenti informazioni sono generalmente estratte (Fig. 20 e Fig. 21):

- **posizione** del bersaglio: coordinate geografiche (E, N; precisione fino a $\pm 2-6$ m) e quota (precisione fino a $\pm 1,5-2$ m);
- **velocità media** annuale di deformazione (mm/anno), con precisione fino a 0,1 mm/anno (dipende dalla distanza dei bersagli dal *reference point*);
- **serie temporale di deformazione** con frequenza di misura pari a quella del tempo di rivisitazione del satellite impiegato, e con precisione fino ad 1 mm sulla singola misura;
- **parametri di qualità**, es. deviazione *standard* associata alla stima della velocità media annua e coerenza⁶ di ciascun bersaglio.

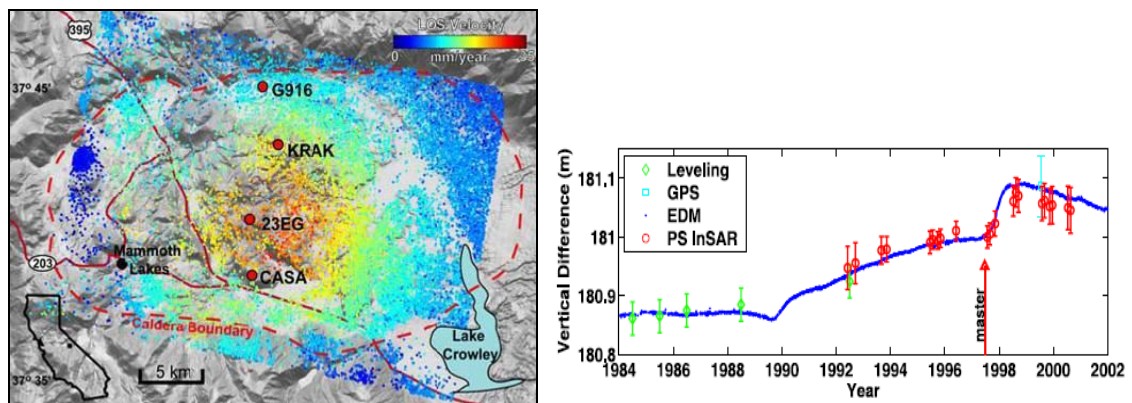


Fig. 21 - Distribuzione dei *Persistent Scatterers* sull'area della Long Valley Caldera, California. Confronto degli spostamenti misurati dai PS con misure *in situ* (Hooper et al., 2004).

Tutte le misure di deformazione derivate da analisi multi-interferometriche sono rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS, *Line of Sight*), e sono di tipo relativo sia nello

⁶ La coerenza dei PS è un parametro di significato differente da quello di coerenza degli interferogrammi. In questo caso, infatti, la coerenza fornisce una misura della qualità del PS, e quantifica la corrispondenza del comportamento del bersaglio con il modello di deformazione utilizzato nell'analisi (tipicamente lineare). La coerenza può assumere valori tra 0 e 1, ovvero compresi rispettivamente tra la totale assenza di corrispondenza tra il dato e il modello e il loro completo accordo.

Durante l'elaborazione, solo i bersagli radar che presentano coerenza maggiore di una certa soglia vengono selezionati. Questo valore di soglia, è stabilito in funzione del numero di immagini usate per l'elaborazione (sono inversamente proporzionali) e in modo che la probabilità di errore nell'identificazione dei bersagli sia contenuta (es. minore di 10^{-5} ; TRE, 2008b).

spazio che nel tempo. Le deformazioni sono calcolate rispetto alla posizione di un punto di riferimento a terra di coordinate note (*reference point*), supposto fermo o espressamente indicato da misure GPS o di livellazione ottica, e rispetto a un'immagine di riferimento scelta all'interno del *dataset* impiegato per l'analisi. Lo spostamento misurato a ogni lettura (acquisizione SAR) rappresenta quindi la differenza tra la quota del terreno in corrispondenza della lettura e quella al tempo dell'acquisizione di riferimento (spostamento zero). Per questo motivo i dati riportati sui grafici delle serie storiche di deformazione generalmente non partono dal valore di zero in corrispondenza della prima acquisizione, ma incrociano l'asse delle ascisse in corrispondenza dell'immagine presa come riferimento.

Generalmente, l'elaborazione multi-interferogramma viene condotta su *datastack* composti da almeno 15-20 immagini SAR acquisite lungo la stessa orbita nominale e con stessa geometria di acquisizione. Ciononostante, il numero di acquisizioni necessario per implementare un'analisi è legato alle caratteristiche dell'area di interesse ed al tipo di sensore radar impiegato.

Negli ultimi anni sono state sviluppate diverse tecniche multi-interferogramma, tra cui:

- PSInSAR (*Permanent Scatterers Interferometric SAR*) del Politecnico di Milano;
- IPTA (*Interferometric Point Target Analysis*) della GAMMA Remote Sensing, Svizzera;
- SBAS (*Small Baseline Subset*) del CNR-IREA di Napoli;
- CPT (*Coherent Pixel Technique*) del Politecnico della Catalogna di Barcellona;
- StaMPS (*Stanford Method for Persistent Scatterers*) dell'Università di Stanford;
- PSP-DIFSAR (*Persistent Scatterers Pairs - DIFSAR*) di e-GEOS, Roma;
- SPN (*Stable Point Network*) di Altamira Information, Barcellona.

Tali tecniche differiscono tra loro per le diverse scelte di elaborazione dei dati, il metodo utilizzato nella selezione dei bersagli radar su cui eseguire le misure di deformazione (*amplitude-based* o *coherence-based*), oltre che per gli algoritmi impiegati per la stima della componente della fase interferometrica legata all'atmosfera e per i modelli utilizzati per modellare l'evoluzione temporale delle deformazioni del terreno (Berardino et al., 2002; Costantini et al., 2000; Duro et al., 2003; Ferretti et al., 2000; Hooper et al., 2004; Mora et al., 2003; Werner et al., 2003). L'evoluzione delle deformazioni nel tempo è generalmente modellata mediante funzioni lineari e, in altri casi, sono adottati modelli più complessi, quali funzioni quadratiche, sinusoidali (stagionali) o loro combinazioni.

Secondo il criterio più comunemente usato, le tecniche multi-interferometriche sono distinte in base all'approccio di elaborazione nelle due seguenti categorie (Wasowski et al. 2007): PS (*Persistent Scatterers*)-based o PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*), e *Interferogram stacking*.

2.4.1 Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

PS (*Persistent Scatterers*)-based o PSI (*Persistent Scatterer Interferometry*): tali tecniche analizzano le informazioni di ampiezza e fase di *pixel* isolati caratterizzati da alti valori di stabilità temporale del segnale. Questo approccio è solitamente implementato mediante la computazione degli interferogrammi generati dalla combinazione di tutte le immagini disponibili con un'unica immagine *master* di riferimento. In seguito ad un'analisi avanzata dei contributi di fase, vengono selezionati i *pixel* che mostrano risposte radar stabili in tutto lo *stack* di interferogrammi, generalmente identificati con il termine di PS o *Persistent Scatterers*.

Tali bersagli radar, utilizzati come caposaldi per la misura delle deformazioni, sono immuni agli effetti di decorrelazione, cioè mantengono le stesse caratteristiche elettromagnetiche (riflettività) in tutte le immagini al variare sia della geometria di acquisizione sia delle condizioni climatiche, preservando quindi l'informazione di fase nel tempo. I PS corrispondono generalmente sia a strutture di origine antropica, quali edifici, monumenti, strutture metalliche, dighe, viadotti, pali, antenne, sia a stabili riflettori naturali come le rocce esposte (Fig. 22); solitamente hanno una dimensione fisica molto più piccola della cella risoluzione dell'immagine e coincidono con il riflettore dominante all'interno della cella.

L'utilizzo degli approcci PSI permette di selezionare quasi tutte le immagini disponibili sulla zona in esame e dunque si differenzia rispetto alla tecnica interferometrica differenziale ed alle tecniche di *interferogram stacking*, per le quali è necessario selezionare solo coppie di immagini caratterizzate da bassi valori di *baseline* spaziale ($< 200\text{-}300\text{ m}$) e provocando di conseguenza una riduzione della frequenza di campionamento.

Esempi di tecniche appartenenti a tale categoria sono la PSInSAR, l'IPTA, la PSP-DIFSAR, la StaMPS e la SPN.



Fig. 22 - Alcuni esempi di strutture a riflettività stabile (TRE, 2008b).

PSInSAR e SqueeSAR

La tecnica dei *Permanent Scatterers* (PSInSARTM o POLIMI PS Technique) è stata sviluppata e brevettata presso il Politecnico di Milano ed è stata concessa in licenza esclusiva nel 2000 a Tele-Rilevamento Europa (TRE) S.r.l., una società di *spin-off* del Politecnico di Milano (Ferretti et al., 2001). Una schematica rappresentazione della base teorica della tecnica PSInSAR è riportata in Fig. 23.

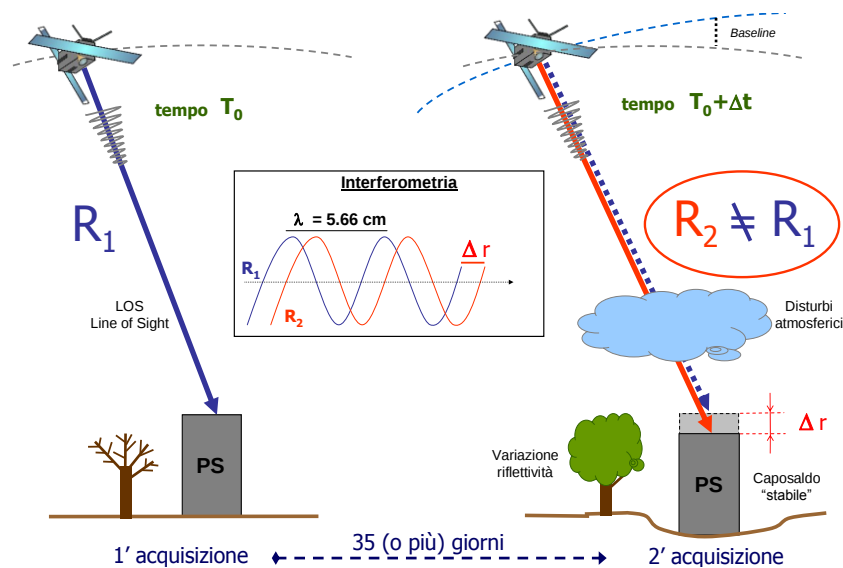


Fig. 23 - Rappresentazione schematica della base teorica della tecnica PS. Sono rappresentati i disturbi presenti nelle acquisizioni SAR: variazione della componente di riflettività dei bersagli che dà luogo a decorrelazione temporale, variazioni della *baseline* normale che danno luogo a decorrelazione geometrica, disturbi atmosferici (TRE, 2008b).

La selezione dell'insieme dei PS viene effettuata attraverso uno studio statistico multi-immagine di tutto il *dataset* disponibile sull'area di interesse e con l'uso di alcuni algoritmi, vengono stimate per ogni PS sia l'entità del disturbo dovuto all'atmosfera terrestre, sia possibili deformazioni superficiali.

La stima del contributo atmosferico (APS, *Atmospheric Phase Screen*), presente tra acquisizioni non simultanee, può essere eseguita sfruttando la sua correlazione spaziale (cfr.

2.3.1). Se sono disponibili numerose acquisizioni SAR della stessa area, la griglia di PS può essere usata per discriminare i vari contributi di fase legati alla topografia, al movimento e all'atmosfera, sfruttando le loro diverse caratteristiche nei confronti del tempo, dello spazio e della geometria di acquisizione (Tabella 2). L'artefatto atmosferico è calcolato come la componente di fase interferometrica che risulta casuale nel tempo ma correlata nello spazio, cioè simile in corrispondenza di punti vicini tra loro.

	Tempo	Spazio	Geometria di acquisizione (B_n , baseline normale)
<i>Moto</i>	Correlato	Variabile	Non Correlato
<i>Topografia</i>	Non Correlato	Variabile	Proporzionale
<i>APS</i>	Non Correlato	Correlato	Non Correlato

Tabella 2 - Differente comportamento dei termini di fase dovuti alla topografia, alle deformazioni e all'APS, nei confronti del tempo, dello spazio e della baseline normale (TRE, 2008a).

Per eseguire stime accurate dei disturbi atmosferici è necessario che la densità spaziale di PS sia sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 PS/km²), vincolo sempre verificato in aree urbane avvalendosi di *dataset* consistenti in almeno 25-30 immagini. In aree a elevata urbanizzazione, la densità spaziale di PS può raggiungere valori fino a 400-600 PS/km² con dati provenienti da sensori ERS ed ENVISAT, ed oltre i 1.000 PS/ km² per analisi con dati TerraSAR-X.

La precisione dei risultati ottenuti è funzione del *data stack* di immagini e della qualità dei PS stessi, cioè di quanto l'informazione di fase disponibile presso ciascun PS è immune ai fenomeni di disturbo. In particolare, i fattori che influenzano la precisione ottenuta con la tecnica PS sono:

- numero e distribuzione temporale delle immagini disponibili sull'area di interesse (maggiore è il numero di dati, maggiore è la probabilità di identificare PS; inoltre più le acquisizioni sono frequenti, migliore è la stima degli spostamenti);
- densità dei PS;
- incertezza nei parametri orbitali e variazioni delle proprietà elettromagnetiche nel tempo;
- rumore atmosferico (eventuali errori residui in caso di condizioni atmosferiche non perfettamente simulabili);
- distanza dei PS dal *reference point* (come per le reti geodetiche tradizionali, la precisione diminuisce con l'aumentare della distanza dal punto di riferimento).

La tecnica PSInSAR può essere applicata su diverse scale e livelli di dettaglio:

- *Local Area*: indagine a scala locale (area analizzata di estensione da 1 a 100 km²) caratterizzata da un grado di dettaglio molto spinto e con la quale la densità dei punti di misura può raggiungere, in area urbana, anche i 1.000 PS/km². Tale analisi può essere utilizzata per monitoraggio di fenomeni circoscritti, come frane o *sinkholes*, a scopo di pianificazione urbana, per il controllo di bacini di estrazione o impianti.
- *Regional Area*: indagine a livello regionale (area analizzata superiore a 50 km²) che costituisce uno strumento operativo molto utile per caratterizzare fenomeni di deformazione estesi (Fig. 24). Tale analisi può essere utilizzata per monitoraggio di frane, subsidenze, faglie sismiche, bacini di estrazione petrolifera o di gas, bacini di stoccaggio e miniere.
- *Linear Structure*: indagine su strutture lineari, quali condotte (es. metanodotti, gasdotti), autostrade, ferrovie, ecc., mediante la quale si forniscono informazioni su una striscia di terreno larga 1.000 metri intorno alla traccia della struttura, nonché informazioni di dettaglio (le serie storiche dei punti) per una striscia di 250 metri nell'intorno del tracciato.

- *Single Building*: fornisce invece un'analisi mirata e circoscritta di singoli edifici in aree urbane che si riferisce a una porzione di territorio pari a 1 km^2 , per la quale si vogliono ricevere informazioni puntuali di spostamento (analisi di singoli edifici, di strutture architettoniche, ecc).

TRE ha recentemente sviluppato un nuovo algoritmo, lo SqueeSARTM, basato sull'analisi dei segnali di fase di bersagli distribuiti, i DS (*Distributed Scatterers*), in aggiunta ai convenzionali PS (<http://www.treuropa.com>; Fig. 25). L'algoritmo permette di eseguire il monitoraggio delle deformazioni superficiali in tutte le aree extra-urbane e con la stessa precisione del convenzionale approccio PSInSAR ma, a differenza della tecnica convenzionale, permette una maggiore comprensione dei fenomeni di spostamento superficiale grazie ad un aumento della copertura dei punti misura (significativo nel caso di frane, aree rocciose e detritiche e, genericamente, aree a più bassa riflettività).

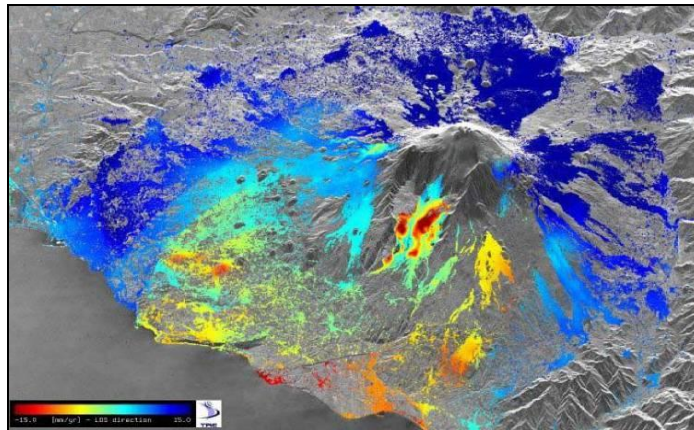


Fig. 24 - Identificazione di faglie attive sul fianco meridionale del Monte Etna mediante analisi PS nel periodo 1995-2000 (TRE, 2008b).

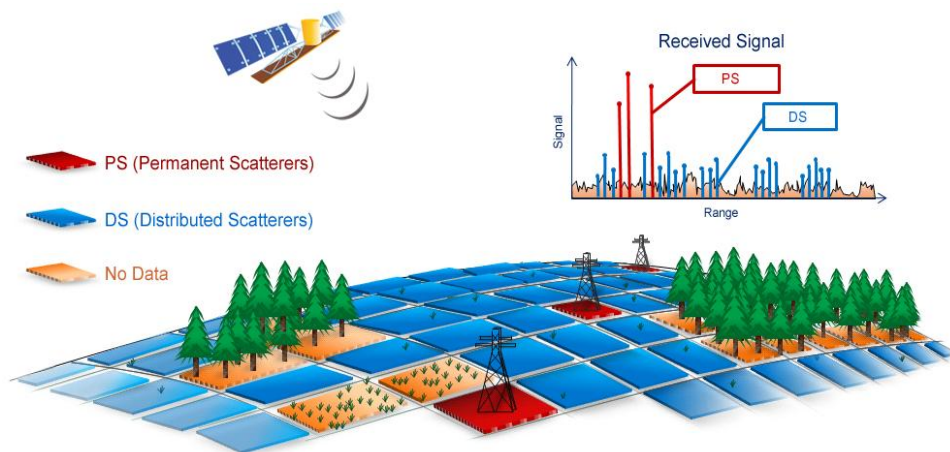


Fig. 25 - Rappresentazione schematica del principio di funzionamento della tecnica SqueeSAR (<http://www.treuropa.com>).

I DS corrispondono ad aree più estese di un singolo *pixel* (a differenza dei PS che corrispondono a bersagli puntiformi), per le quali i segnali retrodiffusi sono meno intensi dei PS a causa dell'assenza di un riflettore dominante, ma si presentano statisticamente omogenei (es. aree detritiche, campi non coltivati, aree desertiche non sabbiose). I valori di deviazione standard sulle serie storiche dei DS sono ridotti rispetto a quelli dei PS, grazie all'aumento della coerenza e la diminuzione del rumore.

IPTA

L'*Interferometric Point Target Analysis* (IPTA) è stata sviluppata dalla società *GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG* (Svizzera), una società nata nel 1995, che si occupa di telerilevamento *radar*, elaborazione e interpretazione dei dati, interferometria, sviluppo di applicazioni, modelli, algoritmi e hardware che lavorano con le microonde.

L'IPTA è una tecnica che permette di sfruttare le caratteristiche temporali e spaziali dei dati interferometrici in corrispondenza di alcuni punti bersaglio (*Point Target*, PT) e calcolare, per ciascuno di essi, le serie storiche di deformazione, le quote del terreno e gli errori di propagazione del segnale derivanti dalla variabilità dell'atmosfera terrestre (Fig. 26).

La tecnica permette di utilizzare nella selezione dei punti di misura all'interno delle immagini SAR, sia algoritmi basati sulla coerenza, sia algoritmi basati sull'ampiezza del segnale (Werner et al., 2003a). Se per l'area d'interesse è disponibile un *dataset* composto da un numero di acquisizioni ridotto, generalmente si utilizza il criterio di selezione basato sull'analisi della coerenza del segnale, al contrario, per *dataset* costituiti da numerose acquisizioni, si usa il criterio di selezione basato sull'analisi di ampiezza dei segnali.

L'algoritmo permette, secondo le esigenze dell'analisi, di selezionare un'unica immagine *master* su cui registrare tutte le altre e quindi con cui creare tutti gli interferogrammi differenziali, o di utilizzare più immagini come *master* creando gruppi di interferogrammi differenziali caratterizzati da bassi valori di *baseline* normale. Generalmente, se il *dataset* possiede più di 10 acquisizioni, gli interferogrammi verranno generati con un'unica immagini *master*.

La separazione dei diversi contributi della fase interferometrica viene effettuata sfruttando la loro correlazione o decorrelazione nel tempo e nello spazio e rispetto alla *baseline* normale. Infatti, il contributo di fase legato all'atmosfera è spazialmente correlato ma decorrelato nel tempo, il contributo di fase legato alla topografia è linearmente correlato con la *baseline* normale (Fig. 27).

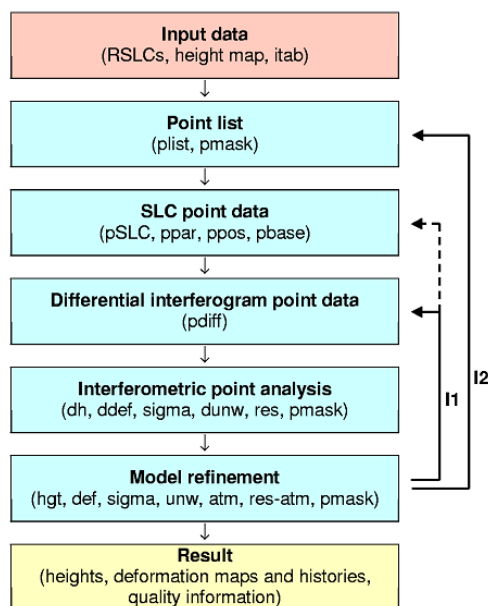


Fig. 26 - Principio di funzionamento della catena di elaborazione IPTA (Werner et al., 2003a; 2003b).

La *GAMMA Remote Sensing* ha prodotto il “*GAMMA SAR and Interferometry Software*”, un pacchetto di applicativi che permettono, tra le varie funzioni di cui sono dotate, di elaborare immagini SAR ed effettuare analisi interferometriche per coppie di immagini e multi-interferogramma. Il software supporta l'intera catena di elaborazione dei dati, dalle immagini

grezze alla realizzazione dei prodotti finali, quali modelli digitali del terreno, mappe di deformazione e mappe d'uso del suolo.

La tecnica IPTA è stata fino a oggi utilizzata per effettuare numerose analisi su immagini acquisite in banda C o L, dai sensori montati su ERS, RADARSAT-1, JERS, ENVISAT, SIR-C e SEASAT o su immagini acquisite da sensori aviotrasportati (Werner et al., 2003b). La tecnica è stata applicata per la misura di deformazioni del terreno indotte da fenomeni di subsidenza in area urbana, subsidenza indotta da attività mineraria e fenomeni franosi (Werner et al., 2003a; Wegmuller et al., 2004a; Strozzi et al., 2005; 2006; Fig. 28).

Attualmente, le sue caratteristiche sono inoltre adeguate per potere affrontare l'elaborazione di immagini acquisite dai nuovi sensori ALOS PALSAR, TERRASAR-X SSC, RADARSAT-2 e COSMO-SkyMed (www.gamma-rs.ch).

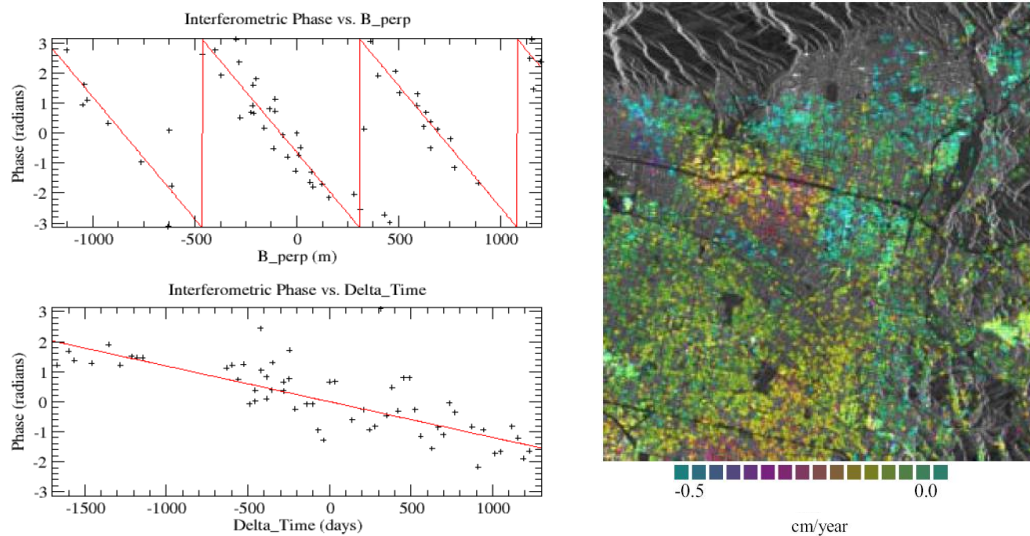


Fig. 27 - Determinazione delle componenti di fase legate alla topografia e alle deformazioni: regressione 2D dei valori della differenza di fase interferometrica tra due punti vicini rispetto alla baseline normale e al tempo. Mappa di deformazione lungo la LOS che mostra un fenomeno di subsidenza legata alla presenza della faglia di Raymond, USA (Werner et al., 2003a).

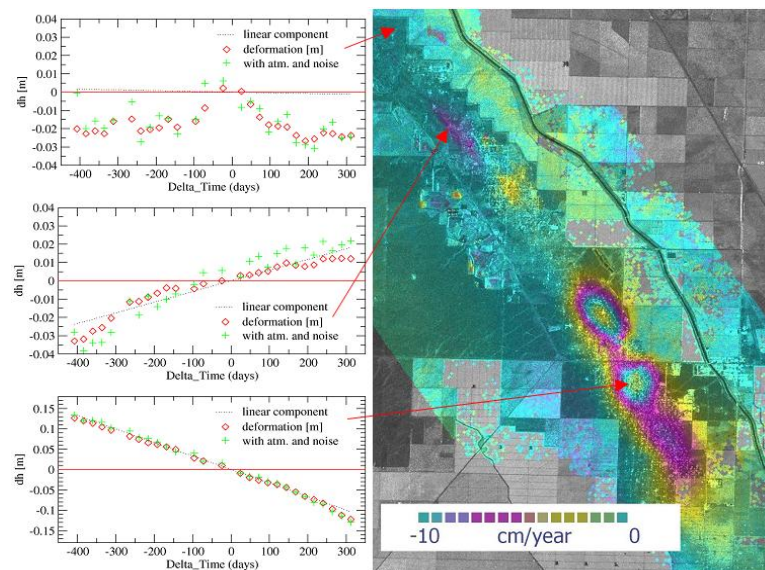


Fig. 28 - Velocità medie di deformazione e serie temporali nell'area di Lost Hills, California, nel periodo 2002-2004, ricavate da analisi IPTA di dati RADARSAT (Wegmuller et al., 2006).

PSP-DIFSAR

La tecnica *Persistent Scatterer Pairs - Differential SAR Interferometry* (PSP-DIFSAR), sviluppata da e-GEOS (www.e-geos.it), appartiene agli algoritmi che selezionano i *pixel* sui quali eseguire le misure di deformazione sulla base dell'analisi della coerenza del segnale. All'interno di lunghi *dataset* di immagini acquisite sull'area di studio, la tecnica permette di selezionare *pixel* caratterizzati da elevati valori di coerenza, corrispondenti a strutture che rimangono coerenti durante l'intero intervallo di tempo coperto dalle acquisizioni (solitamente aree urbane, suburbane e industriali).

La PSP-DIFSAR consente di estrarre, in corrispondenza dei pixel coerenti, mappe di velocità media di deformazione dei capisaldi radar e le serie storiche di deformazione durante l'intervallo coperto dalle acquisizioni.

Le caratteristiche principali della tecnica sono:

- la possibilità di unire mappe di deformazione ottenute da coppie di acquisizioni, in un'unica serie temporale;
- l'implementazione della fase di srotolamento (*phase unwrapping*, cfr. 2.3) a partire dai punti affidabili sparsi sul territorio (punti ad alta coerenza) e la successiva estensione dell'elaborazione alle aree parzialmente coerenti (Costantini & Rosen, 1999);
- l'ottimizzazione della *baseline*, che consiste nel miglioramento dell'accuratezza dei parametri orbitali del satellite effettuata a partire dalle caratteristiche delle immagini ottenute. Tale approccio è fondamentale per portare a termine l'analisi su vaste aree senza incorrere in errori dovuti alla conoscenza inaccurata dei parametri orbitali.

I primi *test* della catena di elaborazione PSP-DIFSAR sono stati portati avanti su alcune aree interessate da fenomeni di subsidenza, quali Bologna e Napoli (Costantini et al., 2000a e 2000b) e sulla frana di Maratea (Berardino et al., 2003), sulla quale le applicazioni hanno dimostrato che le deformazioni misurate dal SAR sono in buon accordo con le misure GPS (Fig. 29). Benché sia stata registrata un'evidente corrispondenza con i dati rilevati a terra, le limitazioni della tecnica legate alla sua capacità di stimare le deformazioni soltanto lungo la direzione della LOS sono risultate rilevanti. Tale limite è maggiormente evidente nello studio di fenomeni franosi rispetto a quelli di subsidenza urbana che sono generalmente caratterizzati da movimenti solo verticali e quindi ben visibili dalla linea di vista del satellite.

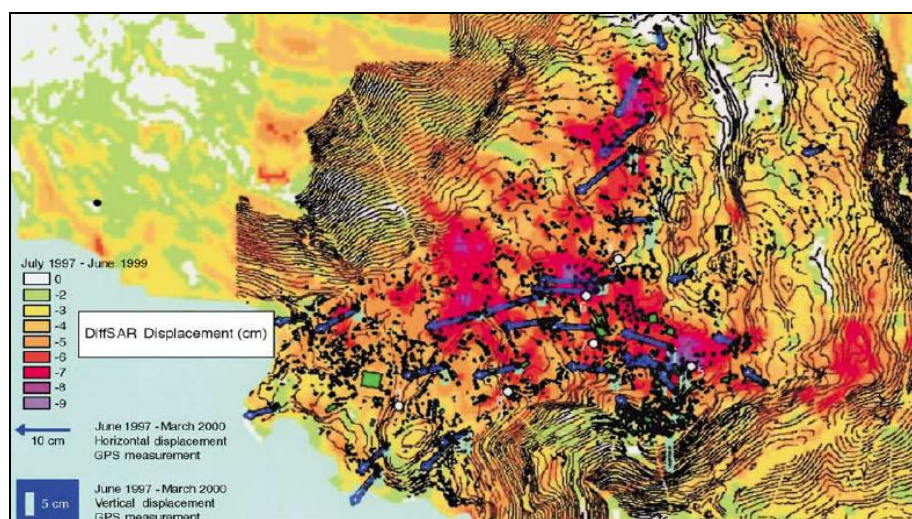


Fig. 29 - Mappa di deformazione nell'area di Maratea (Basilicata), ricavata tramite analisi PSP-DIFSAR implementata su un *dataset* di 7 immagini ERS-2 acquisite in geometria discendente, nel periodo 1997-2000. Confronto con le misure GPS rilevate nello stesso periodo. I punti di misura radar sono stati selezionati in base alla soglia di coerenza di 0,3 (Berardino et al., 2003).

Uno dei vantaggi della tecnica PSP-DIFSAR rispetto ad altre tecniche multi-interferogramma, è la possibilità di elaborare anche *dataset* composti da un ristretto numero di acquisizioni SAR e ottenere un maggior numero di punti di misura, tuttavia ciò avviene a scapito della precisione delle misure ottenute.

2.4.2 Interferogram Stacking

Interferogram stacking: tali tecniche si basano sulla combinazione delle informazioni di fase derivanti dall'analisi di interferogrammi generati dalla combinazione di tutte le acquisizioni disponibili sull'area di interesse (*master multiple*) caratterizzate da bassi valori di *baseline* spaziale (es. < 200-300 m).

Al contrario delle tecniche PSI, questi approcci sfruttano i segnali derivanti dall'integrazione di più celle adiacenti e mediante un'operazione di *complex multi-looking* combinano e connettono la serie temporale dei valori di fase legate alle deformazioni della superficie indagata. Tali tecniche, riducono gli effetti di decorrelazione, massimizzando il numero di *pixel* impiegati per la combinazione dei contributi di fase e migliorando conseguentemente il rapporto segnale rumore, SNR (*Signal-to-Noise Ratio*).

Esempi di tecniche appartenenti a questa categoria sono la SBAS e la CPT.

SBAS

L'algoritmo *Small Baseline Subset* (SBAS), sviluppato dal gruppo di ricerca del CNR-IREA di Napoli, è basato sulla selezione di *pixel* coerenti da interferogrammi a bassa *baseline*, utilizzati per limitare i problemi di decorrelazione spaziale del segnale, e sull'applicazione del metodo della *Singular Value Decomposition* (SVD) per connettere *dataset* di immagini SAR separati da grandi *baseline* (Berardino et al., 2002; Fig. 30).

L'algoritmo si basa sulla generazione di interferogrammi ottenuti a partire da dati acquisiti da orbite sufficientemente vicine (piccole *baseline* normale) e con tempi di rivisitazione non elevati (piccole *baseline* temporali). Queste caratteristiche consentono di minimizzare gli effetti di rumore e incrementare di conseguenza il numero di punti per unità di area sui quali si riesce a fornire una misura affidabile della deformazione.

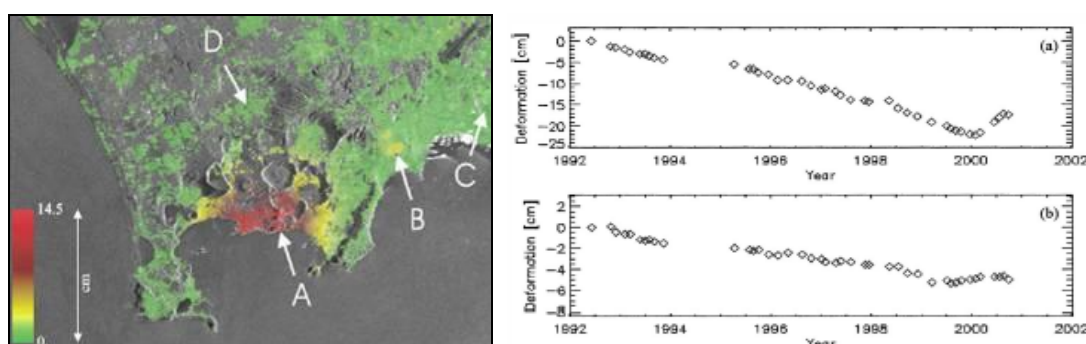


Fig. 30 - Analisi delle deformazioni in prossimità del Vesuvio, nel periodo compreso tra il 1992 e il 2002. Esempi di serie storiche di deformazione di alcuni punti (Berardino et al., 2002).

Sono stati inoltre sviluppati alcuni algoritmi di filtraggio del rumore dovuto ai disturbi atmosferici basati sulle differenze di comportamento del contributo di fase atmosferica e quello legato alle deformazioni. Il contributo atmosferico presenta un certo grado di correlazione spaziale ma risulta decorrelato su intervalli temporali dell'ordine di qualche giorno, viceversa, il segnale di deformazione (segnale utile) risulta essere correlato sia nello spazio, sia nel tempo.

L'approccio SBAS permette inoltre di superare le problematiche legate all'integrazione tra dati ERS1/2 e dati ENVISAT, causate dallo *shift* nella frequenza centrale esistente tra i due satelliti che non permette di ottenere interferogrammi coerenti incrociando i loro dati (Pepe et al., 2005).

La tecnica SBAS è stata applicata in vari casi, sia alle deformazioni del suolo indotte da attività vulcanica, come nel caso dell'area vesuviana (Berardino et al., 2002; Fig. 30) e nel caso del Monte Etna (Lundgren et al., 2004), sia a fenomeni di subsidenza, come nel bacino di Los Angeles (Lanari et al., 2005).

Uno dei vantaggi principali di questo metodo, legato al criterio di selezione dei *pixel* utilizzato, è quello di poter essere impiegato anche con un basso numero di immagini. L'assenza di un numero elevato di acquisizioni SAR è spesso uno dei limiti principali dell'applicazione dei metodi multi-interferogramma. Tuttavia, l'utilizzo di valori di coerenza per la selezione dei *pixel* sui quali eseguire l'analisi provoca una diminuzione della risoluzione spaziale del prodotto finale della tecnica, poiché la coerenza è calcolata su una finestra dalle dimensioni variabili (normalmente 3×3 o 5×5 *pixel*). La riduzione della risoluzione spaziale fa sì che sia limitata la possibilità di misurare movimenti locali.

2.4.3 Potenzialità e limiti

Le numerose sperimentazioni che sono state eseguite sia in Italia che all'estero, hanno permesso di individuare le potenzialità e i limiti delle tecniche multi-interferogramma. Tali approcci, in primo luogo, non richiedono alcun intervento a terra e permettono di studiare ampie porzioni di territorio o zone difficilmente accessibili, con conseguente riduzione dei tempi e dei costi di indagine su larga scala. Essi consentono inoltre di svolgere analisi di fenomeni avvenuti nel passato grazie alla disponibilità degli archivi di immagini SAR costituiti negli ultimi anni dalle varie agenzie spaziali (archivi ERS (1992-2001) ed ENVISAT (2002-oggi) dell'ESA e archivio RADARSAT-1 (2003-oggi) della CSA, cfr. 2.2) e permettono di studiare fenomeni le cui velocità sono estremamente ridotte (mm/anno) e per i quali le tecniche convenzionali richiederebbero anni prima di poter fornire misure significative.

Le tecniche multi-interferogramma superano le tecniche interferometriche tradizionali poiché permettono di stimare e di rimuovere i contributi atmosferici dalla fase interferometrica, sfruttando lunghe serie temporali di acquisizioni relative alla medesima area. Esse consentono inoltre di ridurre gli effetti della decorrelazione temporale e geometrica, scegliendo dei bersagli radar *point-wise*, ovvero che mantengono la stessa riflettività nel tempo e al variare della geometria di acquisizione.

Gli approcci multi-interferogramma permettono di effettuare il monitoraggio delle deformazioni del terreno con precisione elevata sul *trend* di deformazione (precisione nella stima della velocità media fino a 0,1 mm/anno, sulla singola misura spostamento verticale fino a 1 mm e spostamento E-W fino a 1 cm).

In aree a elevata urbanizzazione, la densità spaziale di bersagli radar raggiunge valori molto alti, fino a 400-700 PS/km², ma anche oltre 1.000 PS/km² con dati provenienti da sensori ad alta risoluzione, quelli TerraSAR-X (cfr. 2.2). Tale densità spaziale di caposaldi è di diversi ordini di grandezza superiore rispetto a quanto ottenibile con reti geodetiche convenzionali e fornisce precisione più elevata (millimetrica) rispetto all'analisi GPS (centimetrica) nel calcolo degli spostamenti verticali. Inoltre, i bersagli radar sono già presenti sul terreno e, a differenza dei tradizionali strumenti di misura (capisaldi geodetici, GPS, inclinometri), essi non richiedono alcuna installazione o manutenzione da parte di operatori.

Tali approcci non rappresentano tuttavia uno strumento sostitutivo delle altre tecniche di monitoraggio, bensì si pongono in completa sinergia con esse. L'integrazione dei dati multi-interferometrici con le misure geodetiche tradizionali e GPS (Tabella 3), permette infatti di sfruttare tutti i loro vantaggi e ottenere una visione più completa sull'evoluzione dei fenomeni studiati.

L'uso di immagini radar, e in particolare la loro elaborazione con le tecniche multi-interferogramma, risulta complementare all'interpretazione di immagini ottiche, infatti, queste ultime forniscono buone informazioni in zone poco urbanizzate dove le forme naturali sono ben visibili e non sconvolte dall'architettura urbana, al contrario le immagini radar si prestano bene per lo studio delle deformazioni in area urbana, nella quale sono presenti oggetti che ben riflettono il segnale.

Dati multi-interferometrici	Misure GPS
- misure accurate in direzione verticale - alta densità spaziale - aggiornamento mensile - ottimizzazione del posizionamento delle stazioni GPS permanenti - misure di spostamento lungo la LOS	- misure accurate in direzione orizzontale - bassa densità spaziale - campionamento temporale buono - rimozione degli errori sistematici nei risultati della tecnica PS. Calibrazione dei dati - campo di spostamento 3D

Tabella 3 - Le caratteristiche delle misure multi-interferometriche in relazione a quelle delle misure GPS, dimostrano che le due tecniche sono complementari (TRE, 2008a).

Il limite principale delle tecniche multi-interferometriche, come per l'interferometria SAR convenzionale, è quello della possibilità di apprezzare la deformazione solo lungo la direzione della linea di vista (LOS) e non l'intero vettore spostamento.

A differenza delle analisi interferometriche per coppie di immagini, le analisi multi-interferometriche richiedono un carico computazionale molto elevato e la disponibilità di lunghi *datastack* di immagini radar (almeno 20-30 acquisizioni) per l'individuazione dei bersagli nell'area di studio.

I fenomeni a evoluzione rapida sono difficilmente monitorabili, infatti, se le deformazioni superano la velocità di 1,4 cm/35 giorni (per i satelliti ERS ed ENVISAT dell'ESA), gli eventi non possono essere monitorati senza informazioni ausiliarie provenienti da altra strumentazione e si possono generare problemi durante la fase di *phase unwrapping*, e conseguenti fraintendimenti delle reali deformazioni avvenute nell'area di interesse. Questo limite è legato ai parametri di acquisizione del sensore e in particolare alla lunghezza d'onda utilizzata. Gli spostamenti vengono infatti misurati in termini di frazione della lunghezza d'onda e lo spostamento massimo stimabile correttamente dalla tecnica è di $\lambda/4$ in allontanamento o avvicinamento al sensore. Analogamente a quanto accade per la tecnica DInSAR tradizionale, le tecniche multi-interferometriche consentono di valutare con precisione millimetrica variazioni di distanza sensore-bersaglio pari a una frazione della lunghezza d'onda, ma spostamenti di diversi centimetri vengono equivocati (cfr. 2.3).

A causa delle caratteristiche intrinseche delle informazioni ottenute per mezzo delle analisi multi-interferometriche, quali la misura della componente di deformazione soltanto lungo la linea di vista, la possibilità di misurare solo movimenti superficiali e l'informazione puntuale non distribuita nello spazio, è necessario affiancare le misure satellitari con metodi tradizionali e una serie di dati ancillari di supporto.

Se la zona di interesse è molto vegetata o possiede orografia particolarmente accentuata, la densità di bersagli radar presenti sul territorio può essere estremamente bassa o addirittura insufficiente per comprendere le dinamiche in atto. In questi casi occorre installare sul terreno i riflettori artificiali (*corner reflectors*), che consistono in strutture metalliche che grazie alle caratteristiche costruttive si comportano da caposaldi radar (Fig. 31). I riflettori artificiali sono manufatti metallici di tipo passivo (privi di alimentazione con corrente elettrica) che non richiedono una particolare manutenzione, e che in seguito al momento dell'installazione possono essere identificati e monitorati nelle immagini SAR (Fig. 31), tra i quali:

- lo specchio piano (*planar*), una lastra quadrata di lato 120 cm, adatto a una collocazione in ambiente urbano;
- il dietro, composto da due superfici metalliche quadrate di lato 100 cm, disposte a 90°;
- il triedro: *corner* (un triedro cavo triangolare realizzato combinando tre superfici metalliche in modo da formare una piramide a base triangolare e lato pari a circa 170 cm) o il triedro cubo (tre lastre quadrate di lato 170 cm perpendicolari tra loro), adatti a installazioni in aree extra-urbane.



Fig. 31 - Riflettori artificiali: specchio, diedro, triedro e triedro cubo (TRE, 2008b).

L'ESA ha recentemente finanziato un progetto denominato PSIC4 (*PS Interferometry Codes Cross Comparison and Certification for Long Term Differential Interferometry*) e finalizzato al confronto tra le varie metodologie multi-interferogramma sviluppate negli ultimi anni. Il progetto PSIC4, ha previsto l'analisi mediante i diversi approcci multi-interferogramma di uno stesso *dataset* di immagini SAR su un *test-site* di riferimento sul quale sono disponibili dati di monitoraggio *in situ*. Scopo del progetto è stato quello di definire uno *standard* nell'analisi multi-interferogramma in grado di garantire un livello minimo di qualità dei risultati e valuti le caratteristiche delle misure ottenute, soprattutto in termini di precisione nella stima delle deformazioni e precisione nella geo-localizzazione delle misure. Un approfondimento relativo ai risultati del progetto può essere effettuato consultandone il report finale, disponibile sul sito <http://earth.esa.int/psic4/>.

Riassumendo, nella stima delle deformazioni del terreno le tecniche multi-interferogramma presentano le seguenti caratteristiche:

Potenzialità:

- Monitorare il territorio senza entrarvi in contatto diretto;
- Operare con continuità, di giorno e di notte e in qualunque condizione atmosferica;
- Monitorare fenomeni di grandi dimensioni;
- Controllo di deformazioni con la precisione del millimetro;
- Possibilità di effettuare stime puntuali;
- Capacità di separare i contributi di fase interferometrica (errore DEM, deformazioni, atmosfera);
- Effettuare *back monitoring* grazie agli archivi di immagini e possibilità di ricostruire serie storiche di deformazione;
- Elevata densità spaziale di capisaldi radar già presenti sul territorio;
- Abbattimento costi e tempi di indagine su larga scala;
- Possibilità di stimare deformazioni in direzione verticale ed E-W;
- Sono utilizzabili immagini separate anche da *baseline* geometrica elevata;
- Precisione verticale delle misure superiore rispetto alla tecnica GPS;
- Sinergia con fotointerpretazione e tecniche di monitoraggio convenzionali;
- Complementarietà con approccio geologico-geomorfologico per lo studio dei fenomeni di dissesto.

Limiti:

- Capacità di misurare la deformazione soltanto lungo la linea di vista del sensore;
- Presenza di deformazioni prospettiche nelle immagini;
- La copertura vegetale riduce la penetrazione del segnale al suolo;
- Impossibilità di stimare la componente di deformazione lungo la direzione N-S;
- Misure puntuali non distribuite nello spazio;
- Necessità di supporto tramite tecniche convenzionali per l'interpretazione.

3 APPLICABILITÀ DELLE ANALISI INSAR AL CONTROLLO DEI DISSESTI

L'esperienza ottenuta dalle numerose applicazioni delle tecniche di interferometria SAR satellitare effettuate negli ultimi anni, ha permesso di analizzare criticamente la loro applicabilità al controllo dei dissesti geologici, in relazione alle diverse tipologie, velocità, uso del suolo, scale spaziali e temporali che li caratterizzano.

In generale, i fattori principali che influiscono sull'identificazione di aree coerenti (per l'interferometria convenzionale) e bersagli radar (per interferometria multi-immagine) per eseguire misure di deformazione sono:

- deformazioni prospettiche (in relazione all'orientamento della superficie rispetto alla linea di vista) e presenza di zone d'ombra;
- materiale di cui è costituito il bersaglio;
- uso del suolo (alte densità di PS si riscontrano in corrispondenza dei centri urbani mentre le aree vegetate o periodicamente innevate/ghiacciate non presentano PS al loro interno poiché la loro rapida variabilità provoca decorrelazione temporale);
- frequenza, polarizzazione e ampiezza del segnale (diversa sensibilità degli oggetti in relazione al loro materiale e alle loro dimensioni);
- cambiamenti nelle proprietà dielettriche del bersaglio (provocano decorrelazione temporale);
- movimento rapido del bersaglio (spostamenti più rapidi di 1 cm /35 giorni, per le immagini ERS o ENVISAT, provocano decorrelazione).

Lo studio a priori di queste caratteristiche nel territorio in esame, può fornire importanti indicazioni, già prima di implementare l'elaborazione InSAR o PSI, sulla predisposizione delle aree in studio nei confronti dell'analisi; tuttavia, esso non permette di stabilire con certezza il numero di bersagli identificabili mediante l'analisi e la loro distribuzione areale.

3.1 *Analisi per tipologia*

L'interferometria radar satellitare, sia nell'approccio convenzionale sia avanzato multi-immagine, si è rivelata uno strumento con elevatissime potenzialità nel controllo delle deformazioni superficiali e, in particolare, per lo studio di:

- fenomeni franosi (es. Fruneau et al., 1996; Carnec et al., 1996; Kimura & Yamaguchi, 2000; Farina et al., 2003; Colesanti et al., 2003c; Colesanti & Wasowski, 2004; Hilley et al., 2004; Canuti et al., 2005a; Ferretti et al., 2005; Casagli et al., 2006a; Farina et al., 2007);
- subsidenza (es. Massonet et al., 1997; Jönsson et al., 1998; Ferretti et al., 2000b e 2000c; Colombo et al., 2003; Canuti et al., 2005b; Colesanti et al., 2005);
- movimenti tettonici (es. Colesanti et al., 2003b; Massonet et al., 1994; Ferretti et al., 2004; Musson et al., 2004; Bürgmann et al., 2006);
- attività vulcanica (es. Massonet et al., 1995; Salvi et al., 2004; Casagli et al., 2006b);
- dinamica dei ghiacciai (es. Goldstein et al., 1993).

All'interno di ciascuna tipologia di fenomeno non tutti i movimenti sono misurabili, in relazione alla velocità di deformazione che li caratterizza, alla loro estensione, all'uso del suolo, alla dinamica di movimento, come discusso in dettaglio all'interno delle sezioni successive.

I fenomeni di subsidenza, legati a cause naturali (compattazione di sedimenti, movimenti tettonici, ecc.) o antropiche (carico esercitato da manufatti artificiali, estrazione di fluidi dal sottosuolo, attività mineraria), possono essere monitorati agevolmente mediante l'uso delle tecniche InSAR e PSI, sia a livello regionale che a livello locale, grazie alla velocità con la quale essi evolvono (Fig. 32). Le aree in subsidenza generalmente riguardano zone intensamente

urbanizzate, dunque la densità di bersagli radar individuabili su di esse e l'accuratezza delle misure sono notevolmente maggiori rispetto a qualunque altra metodologia di monitoraggio.

I fenomeni di *sinkholes*, dovuti alla presenza nel sottosuolo di cavità di origine antropica o naturale, evolvono con velocità piuttosto elevate rispetto alla scala di misura delle tecniche multi-interferogramma. Tuttavia, in alcune applicazioni delle tecniche multi-interferogramma per l'individuazione dei segni precursori di tali fenomeni, sono stati raggiunti dei risultati molto interessanti (Ferretti et al., 2000a). L'individuazione di movimenti precursori e il monitoraggio di *routine* dei fenomeni di *sinkholes* mediante l'uso di tecniche multi-interferogramma non è attualmente uno strumento operativo a causa, principalmente, dell'insufficiente frequenza di acquisizione delle immagini satellitari nei confronti della velocità con cui evolvono tali fenomeni e, in secondo luogo, alla bassa risoluzione spaziale delle immagini satellitari disponibili nei confronti della scala spaziale che li caratterizza. L'operatività della nuova missione spaziale COSMO-SkyMed apporterà, a questo proposito, un contributo molto importante grazie al miglioramento del campionamento temporale ottenibile mediante le analisi multi-interferogramma e all'aumento della risoluzione spaziale delle immagini acquisite (cfr. 2.2).

Le aree sismiche e quelle vulcaniche possiedono caratteristiche tali da potere essere analizzate e monitorate mediante interferometria radar satellitare, infatti, queste sono caratterizzate da deformazioni estremamente lente e riguardano generalmente aree molto estese (Fig. 33).

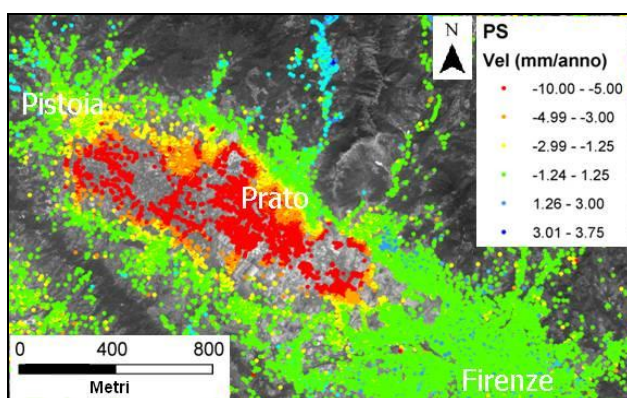


Fig. 32 - Subsidenza nell'area di Prato e Pistoia, rilevata grazie all'analisi PS eseguita su dati ERS1/2 relativi al periodo 1992-2002 (Canuti et al., 2005a).

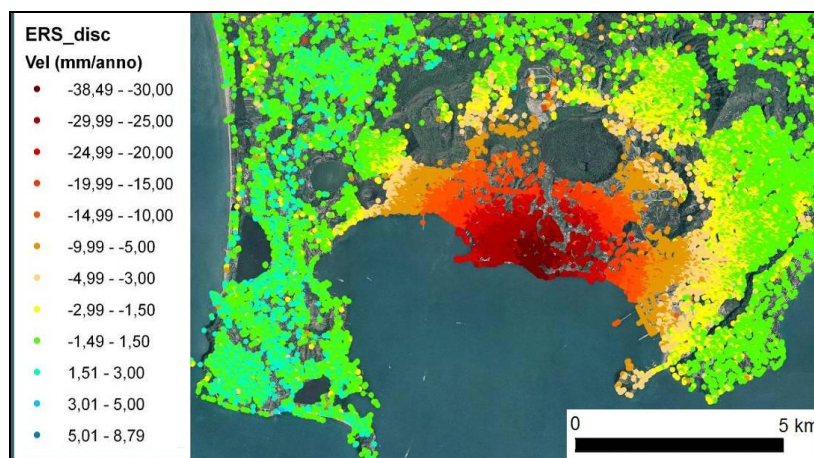


Fig. 33 - Individuazione dei fenomeni di deformazione associati alla presenza di attività vulcanica nei Campi Flegrei mediante analisi PS di dati ERS1/2 discendenti del 1992-2001 (Casagli et al., 2008b).

Per quanto riguarda i fenomeni franosi, si può analizzare l'applicabilità delle tecniche interferometriche satellitari in relazione alle loro diverse tipologie o meccanismi, nonché in base alla velocità che li caratterizza, alla loro dimensione, alla scala temporale e all'uso del suolo (come discusso nelle sezioni che seguono).

Facendo riferimento alle diverse tipologie di fenomeni franosi individuate nella classificazione di Cruden & Varnes (1996) e tenendo conto delle diverse tipologie di materiali coinvolti, l'applicabilità delle tecniche interferometriche satellitari è schematizzata nella tabella 4.

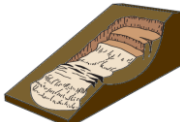
TIPOLOGIA DI FRANA		Materiale coinvolto	Applicabilità InSAR satellitare
	Crollo	<i>Roccia/detrito/terra</i>	NO/Parzialmente
	Ribaltamento	<i>Roccia/detrito/terra</i>	NO/Parzialmente
	Scivolamento	<i>Roccia</i>	SI
		<i>Detrito/terra</i>	SI
	Colata	<i>Roccia</i>	SI
		<i>Terra</i>	Parzialmente
		<i>Detrito</i>	NO
	Espansione	<i>Roccia/detrito/terra</i>	Parzialmente

Tabella 4 - Applicabilità delle tecniche InSAR satellitari alle diverse tipologie di frane individuate da Cruden & Varnes nel 1996. Rappresentazione schematica delle diverse tipologie di frana, modificata da <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>.

I fenomeni di crollo e ribaltamento sono difficilmente osservabili mediante interferometria da satellite a causa della rapidità con cui si sviluppano. Benché in letteratura non esistano esempi di questo tipo di applicazione, è ipotizzabile che le configurazioni multi-interferogramma siano in grado in determinate condizioni, quali il caso di crolli localizzati in corrispondenza della parte superiore dei versanti, di misurare i movimenti precursori che precedono il distacco e la caduta del materiale, nonché la fase iniziale di un ribaltamento lento.

Per il monitoraggio dei fenomeni di scivolamento, le tecniche interferometriche satellitari hanno dato ottimi risultati, sia per movimenti traslativi sia rotazionali (es. Rizzo & Tesauro, 2000; Casagli et al., 2004; Colesanti & Wasowski, 2004; Casagli et al., 2005; Strozzi et al., 2005; Casagli et al., 2006a).

Per le colate, in funzione del materiale coinvolto, si possono ottenere risultati diversi. I fenomeni in roccia, caratterizzati da movimenti generalmente molto lenti distribuiti in maniera continua all'interno della massa spostata senza una ben definita superficie di dislocazione, risultano monitorabili mediante interferometria SAR da satellite. Le colate in terra lo sono soltanto fino a quando il contenuto d'acqua è limitato e i movimenti rimangono molto lenti (Allemand et al., 2003). Le colate di detrito, a causa dell'estrema rapidità con cui si sviluppano, sono invece fuori dalle capacità di misura delle tecniche InSAR.

I fenomeni di espansione laterale possono essere parzialmente controllati, misurandone la componente deformativa sub-verticale, legata alla subsidenza dei livelli competenti ed indotta dall'estensione sub-orizzontale di livelli sottostanti a minor competenza. Chiaramente, le espansioni di terreni soffici a seguito di fenomeni di liquefazione non sono misurabili mediante interferometria da satellite a causa della loro rapidità.

3.2 Analisi per velocità caratteristica

In generale le tecniche si prestano per l'analisi di dissesti a cinematica lente, tuttavia i fenomeni che possono essere controllati variano in funzione dei dati SAR utilizzati poiché le capacità della tecnica sono strettamente connesse con la lunghezza d'onda del segnale utilizzato, il ciclo di rivisitazione del satellite, il numero di acquisizioni disponibili sull'area di interesse e la loro frequenza temporale.

Facendo riferimento alla scala delle velocità delle frane proposta dallo IUGS/WGL (1995) e da Cruden & Varnes (1996) e alle caratteristiche delle tecniche InSAR, è possibile delineare quali siano i fenomeni che possono essere monitorati, come riportato sinteticamente nella tabella 5.

CLASSE DI VELOCITÀ		Velocità	Applicabilità InSAR satellitare
	<i>Estremamente lento</i>	< 16 mm/anno	SI
	<i>Molto lento</i>	0,016 - 1,6 m/anno	SI
	<i>Lento</i>	1,6 m/anno - 13 m/mese	NO
	<i>Moderato</i>	13 m/mese - 1,8 m/h	NO
	<i>Rapido</i>	1,8 m/h - 3 m/min	NO
	<i>Molto rapido</i>	3 m/min - 5 m/s	NO
	<i>Estremamente rapido</i>	> 5 m/s	NO

Tabella 5 - Applicabilità delle tecniche InSAR satellitari alle classi di velocità delle frane proposte dal IUGS/WGL (1995) e da Cruden & Varnes (1996) (modificata da Canuti et al., 2004).

L'interferometria da satellite implementata con i sensori attualmente operativi, e quindi con tempi di ricopertura dell'ordine del mese o della settimana, permette di misurare solamente le prime due delle sette classi di velocità dei fenomeni franosi, ossia le frane estremamente lente e quelle molto lente.

Infatti, in relazione al tempo di rivisitazione dei satelliti attualmente operativi, la velocità di deformazione massima misurabile con le interferometria radar satellitare senza incorrere nei problemi di ambiguità delle misure, risulta di circa 10-15 cm/anno utilizzando sensori radar che acquisiscono in banda C (cfr. 2.2.1) e, di circa 30-40 cm/anno, utilizzando sensori radar che acquisiscono in banda L (cfr. 2.2.2).

Benché le classi di velocità analizzate nella tabella 5 si riferiscano ai fenomeni di instabilità di versante, i valori limite dei tassi di deformazione monitorabili per mezzo delle tecniche di interferometria radar satellitare risultano validi per tutti i fenomeni di deformazione superficiale quali subsidenze, faglie e aree vulcaniche. Al contrario, sono attualmente non monitorabili i fenomeni a evoluzione rapida o caratterizzati da accelerazione repentine. L'uso di una bassa lunghezza d'onda, per esempio quella dei satelliti ERS dell'ESA, che utilizzano la banda C (5,66 cm), permette di misurare uno spostamento di 1 mm lungo la LOS avvenuto tra due acquisizioni successive, viene letto dal sensore a bordo dei satelliti ERS, sotto forma di una differenza di fase di circa 13 gradi, pertanto misurato senza problemi. Tuttavia, nel caso di

fenomeni di deformazione caratterizzati da evoluzione particolarmente rapida, si può presentare il problema dell'equivocazione di fase che può complicare l'interpretazione dei risultati. Infatti, se il bersaglio è soggetto a spostamento lungo la LOS che si avvicina a $1,4 \text{ cm } (\lambda/4)$ tra due acquisizioni successive, le misure possono essere ambigue (*aliased*) e la stima dello spostamento può non essere corretta. In generale, più lento è il movimento, più bassa è la probabilità che si abbiano errori di srotolamento (cfr. 2.3). Come regola pratica, considerando la presenza dei rumori, dell'irregolarità delle acquisizioni e delle differenze di comportamento deformativo dei PS dal modello utilizzato, è possibile misurare senza problemi velocità in direzione LOS minori di 10-14 cm/anno (per sensori ERS ed ENVISAT). In caso contrario, se non sono disponibili informazioni a priori sul comportamento dei punti, lo spostamento sarà probabilmente sottostimato e/o equivocato e la sua direzione (in avvicinamento o allontanamento dal satellite) potrà non essere corretta.

3.3 Analisi per copertura del suolo

L'applicabilità delle tecniche interferometriche satellitari alle diverse classi d'uso del suolo è riportata nella tabella 6. Tali tecniche permettono di ottenere ottimi risultati nel monitoraggio delle deformazioni nella sua configurazione tipica (banda C), prevalentemente su aree urbanizzate. Più in dettaglio, operando in banda C la tecnica differenziale può fornire misure accurate solo in caso di tessuto urbano che abbia una sufficiente continuità spaziale, mentre le tecniche multi-interferogramma permettono di misurare anche spostamenti in corrispondenza di edifici sparsi, come nel caso di ambienti rurali.

Nel caso di zone agricole o coperte da vegetazione arbustiva si possono ottenere risultati soddisfacenti con i dati in banda C solo limitatamente a periodi in cui non avvengono notevoli variazioni delle proprietà elettromagnetiche dello scenario dovute ad esempio alla crescita della vegetazione o alle attività agricole. L'interferometria in banda L (cfr. 2.2.2), grazie alla capacità del segnale radar in questa banda di penetrare la vegetazione, permette invece di ottenere misure anche in aree extra-urbane. Al contrario, i segnali in banda X, essendo caratterizzati da una lunghezza d'onda meno elevata (cfr. 2.2.3), possiedono una capacità di penetrazione della vegetazione ancora più ridotta rispetto a quelli appartenenti alla banda C. Poiché spesso i fenomeni gravitativi avvengono generalmente in aree montuose, le difficoltà legate alla carenza o all'assenza di bersagli radar e le significative deformazioni prospettiche dovute alla topografia e alla presenza di copertura nevosa, fanno sì che l'interferometria radar satellitare presenti notevoli difficoltà nel monitoraggio di tali aree.

Un esempio della quantità di informazioni ottenibili mediante l'interferometria multi-immagine in relazione alle diverse classi d'uso del suolo, sviluppata nell'ambito del progetto TerraFirma per la regione Calabria, è riportato nella fig. 34 (Pancioli & Farina, 2007; Pancioli & Casagli, 2008).

USO DEL SUOLO	Applicabilità InSAR satellitare		
	Banda L	Banda C	Banda X
<i>Territori modellati artificialmente</i>	SI	SI	SI
<i>Territori agricoli</i>	SI	SI	SI
<i>Territori boscati e ambienti semi-naturali</i>	SI Alta penetrazione del segnale	Parzialmente Media penetrazione del segnale	NO Bassa penetrazione del segnale
<i>Zone umide</i>	Parzialmente	Parzialmente	Parzialmente
<i>Corpi idrici</i>	NO	NO	NO

Tabella 6 - Applicabilità delle tecniche InSAR satellitari alle diverse classi di uso del suolo, riferita al livello 1 della classificazione CORINE Land Cover del 2000 e in relazione alle bande L, C e X.

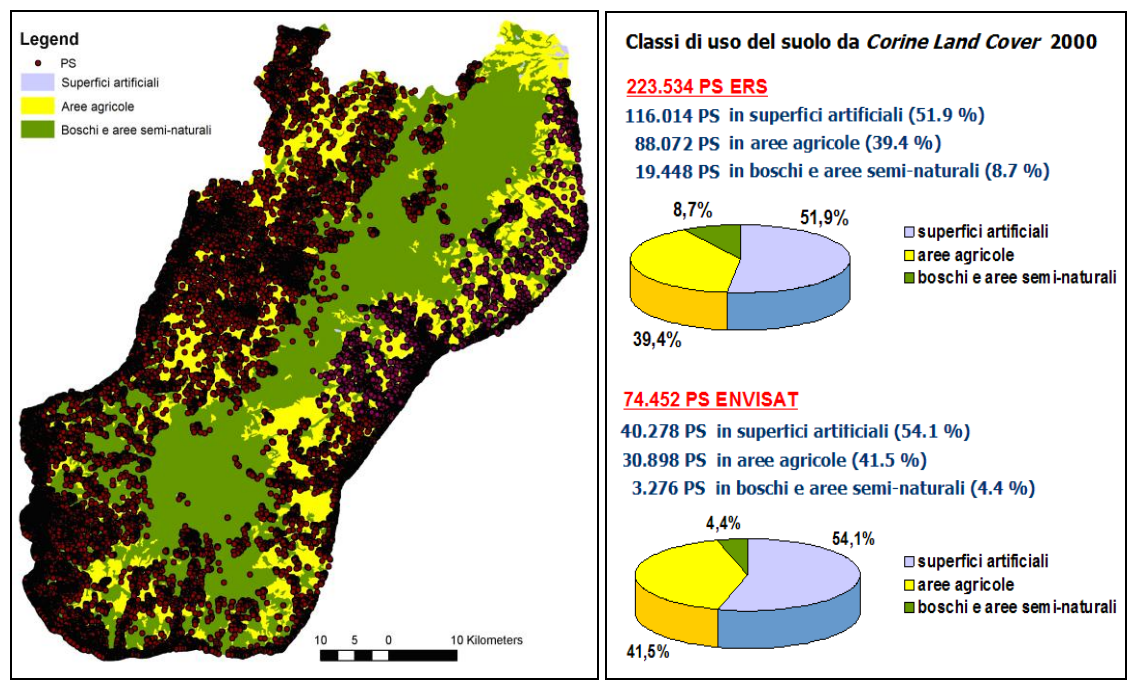


Fig. 34 - Quantità di bersagli radar individuati mediante la tecnica PS in corrispondenza delle diverse classi d’uso del suolo nella provincia di Reggio Calabria e nelle porzioni meridionali delle provincie di Vibo Valentia e Catanzaro (Pancioli & Farina, 2007; Pancioli & Casagli, 2008).

3.4 Analisi per scala spaziale e temporale

L’applicabilità delle tecniche interferometriche satellitari alle diverse scale spaziali è riportata nella tabella 7, secondo la quale, dal punto di vista della scala spaziale possono trarre beneficio dall’utilizzo dell’interferometria satellitare sia l’analisi a larga scala sia l’analisi a scala di versante. Infatti, grazie alla possibilità di coprire aree che superano i 1.000 km² con una singola acquisizione, l’interferometria da satellite può essere utilizzata per il monitoraggio e la mappatura dei dissesti idrogeologici a larga scala e, grazie all’elevata risoluzione spaziale delle immagini (fino a 1 m) ed alla capacità di fornire misure di spostamento accurate relative a singole strutture o edifici, è possibile portare avanti analisi di dettaglio (es. controllo a scala di versante di specifici fenomeni).

Scala Spaziale (km ²)		Applicabilità InSAR satellitare
<i>Scala locale</i> 	0 - 1	SI
	1 - 10	SI
<i>Larga scala</i> 	10 - 100	SI
	100 - 1.000	SI
	1.000 - 10.000	Parzialmente

Tabella 7 - Applicabilità delle tecniche InSAR satellitari rispetto alla scala spaziale dei fenomeni franosi (modificata da Canuti et al., 2004).

È possibile dunque utilizzare queste tecniche sia per analisi a scala regionale o di bacino, a supporto della creazione di mappe inventario o la valutazione della pericolosità, sia per il monitoraggio di specifici fenomeni di dissesto, fornendo informazioni dettagliate sulla distribuzione spaziale delle deformazioni e sulle loro variazioni nel tempo.

Nella tabella 8 è riportata l'applicabilità delle tecniche interferometriche satellitari rispetto alle diverse scale temporali. La frequenza di acquisizione con cui si possono ottenere misure ha una ricaduta sia sulla velocità dei fenomeni che possono essere monitorati, sia sulla possibilità di usare le tecniche come sistema di mappatura e monitoraggio in tempo differito, o come strumento di sorveglianza in tempo reale (cfr. 5.4).

La maggior parte dei satelliti attualmente disponibili possiede una frequenza di acquisizione mensile (es. 24 giorni per RADARSAT, 35 giorni per ERS ed ENVISAT, cfr. 2.2). Tuttavia, la disponibilità delle immagini acquisite dalle nuove missioni satellitari, come TerraSAR-X e COSMO-SkyMed, grazie a tempi di rivisitazione più ridotti, permette anche di eseguire analisi con la frequenza settimanale (cfr. 2.2.3). Inoltre, l'esistenza di archivi d'immagini creati dal 1992, rende la configurazione da satellite adatta ad analisi delle deformazioni pregresse a lungo periodo, fornendo quindi informazioni preziose sulla dinamica delle deformazioni avvenute in passato e su quei fenomeni che possiedono un'evoluzione particolarmente lenta e richiederebbero degli anni e costi molto elevati per potere essere controllati.

Satelliti <i>tempo di rivisitazione</i>	SCALA TEMPORALE				
	<i>Giorni</i>	<i>Settimane</i>	<i>Mesi</i>	<i>Anni</i>	<i>Decenni</i>
TerraSAR-X, TanDEM-X <i>11 giorni</i>		x	x	x	x
COSMO-SkyMed <i>16 giorni</i>		x	x	x	x
RADARSAT1/2 <i>24 giorni</i>			x	x	x
ERS1/2, ENVISAT <i>35 giorni</i>			x	x	x
JERS-1 <i>44 giorni</i>			x	x	x
ALOS <i>46 giorni</i>			x	x	x
Applicabilità InSAR satellitare	NO	Parzialmente	SI	SI	SI

Tabella 8 - Applicabilità delle tecniche InSAR satellitari rispetto alla scala temporale dei fenomeni franosi, in relazione ai diversi tempi di rivisitazione dei satelliti disponibili e le diverse bande: banda C (azzurro), L (arancione) e X (verde); cfr. Tabella 1.

4 POST-ELABORAZIONE DI DATI IN SAR

All'interno di questo capitolo sono descritte tutte le fasi di post-elaborazione (*post-processing*) dei risultati delle analisi interferometriche satellitari, facendo riferimento ai prodotti ottenibili da entrambe le categorie di analisi interferometriche, le elaborazioni differenziali (cfr. 2.3) e le elaborazioni multi-interferogramma (cfr. 2.4). Tuttavia, a causa del più frequente utilizzo delle analisi multi-interferometriche rispetto alla tecnica differenziale nell'ambito delle applicazioni di protezione civile volte alla gestione del rischio geologico, gli esempi illustrati e gran parte delle fasi di *post-processing* descritte, faranno riferimento esclusivo alle tecniche multi-interferogramma.

4.1 Visualizzazione e classificazione

I dati ottenuti da un'elaborazione interferometrica differenziale, consistono in immagini *raster* relative all'area di interesse, nelle quali sono registrati i valori di deformazione misurati nell'intervallo di tempo che intercorre tra le due acquisizioni scelte per implementare l'analisi. La distribuzione spaziale di queste misure di deformazione non è omogenea, infatti, durante la fase di *processing*, vengono selezionati solo i *pixel* caratterizzati da elevati valori di coerenza del segnale (cfr. 2.3), ovvero i punti in cui l'ipotesi fondamentale dell'interferometria è maggiormente rispettata.

I risultati di un'analisi interferometrica differenziale possono essere integrati agevolmente in ambiente GIS e sovrapposti alla base cartografica prescelta (cartografia tecnica regionale, a DTM o ortofoto). Generalmente, le mappe ottenute sono visualizzate in funzione della deformazione misurata nell'intervallo di tempo che intercorre tra l'acquisizione delle due immagini della coppia interferometrica, mediante l'uso di una apposita scala di colori. In tale rappresentazione, le aree caratterizzate da deformazioni contenute e che possono quindi considerarsi stabili, sono rappresentate solitamente in verde, mentre le aree caratterizzate da deformazioni in allontanamento e in avvicinamento rispetto al sensore sono rappresentate rispettivamente in rosso e in blu (Fig. 35).

Per convenzione, valori di velocità di segno negativo indicano un allontanamento del terreno dal satellite, mentre segni positivi indicano movimenti in avvicinamento al satellite.

I valori di deformazione caratteristici delle aree stabili non sono assoluti, bensì dipendono strettamente dalla lunghezza d'onda del segnale utilizzato (cfr. 2.2), dall'accuratezza delle misure ottenute (centimetrica) e dalle caratteristiche evolutive del fenomeno di interesse.

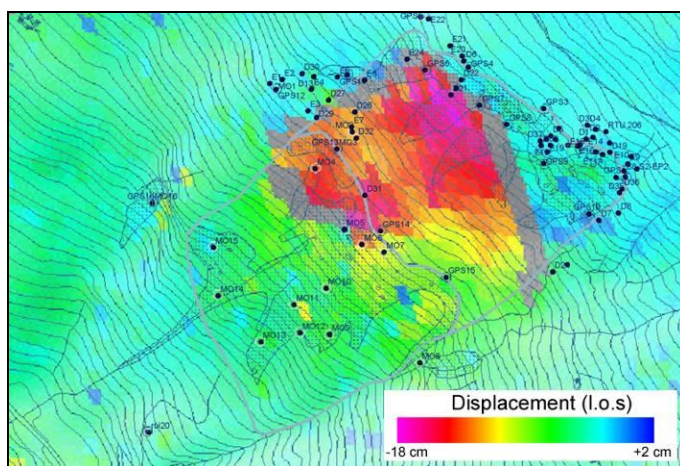


Fig. 35 - Mappa di spostamento della frana del Ruinon (in grigio) nel periodo 10/10/94-23/11/94. In nero è riportata l'ubicazione della strumentazione *in situ* (Strozzi et al., 2005).

I dati ottenuti da un'elaborazione interferometrica multi-immagine, consistono invece in un insieme di punti appartenenti all'area di interesse, in corrispondenza dei quali sono immagazzinati i valori di deformazione misurati nell'intervallo di tempo coperto dalle acquisizioni scelte per implementare l'analisi. Grazie al loro formato di registrazione (vettoriale), i risultati ottenuti per mezzo di un'analisi multi-interferogramma possono essere agevolmente integrati in ambiente GIS e sovrapposti alla base cartografica prescelta (cartografia tecnica regionale, DTM o ortofoto).

I punti di misura ottenuti sono quindi importati sul supporto prescelto e successivamente visualizzati in funzione della velocità media di spostamento registrata nel periodo coperto dalle acquisizioni, mediante l'uso di una scala di colori. Una scelta comune consiste nell'adottare una scala di colori graduati, centrata sul valore zero di velocità e con classi di ampiezza regolare per apprezzare anche variazioni contenute del tasso di deformazione. Un esempio di scala di colori utilizzabile è riportato nella Fig. 36, in cui le tonalità di colore passano gradualmente dal rosso, al verde e al blu, con classi di dimensioni uniformi e velocità saturate in funzione della variabilità dei colori presenti e in funzione dei valori minimi e massimi di velocità registrati nell'area di interesse. Così come è stato detto per la rappresentazione dei risultati delle analisi DInSAR, anche per le analisi multi-interferometriche i valori di velocità di segno negativo indicano convenzionalmente un allontanamento del bersaglio dal satellite, mentre segni positivi indicano movimenti in avvicinamento.

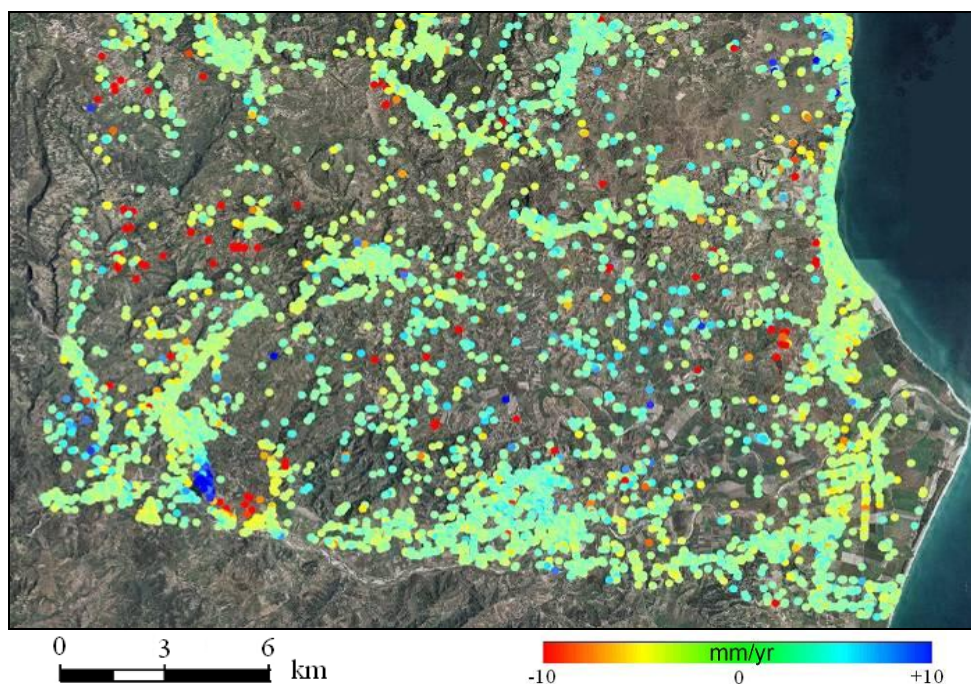


Fig. 36 - Esempio di rappresentazione del dato radar satellitare multi-interferometrico secondo una scala di colori graduati, con intervallo di variazione compreso tra ± 10 mm/anno (Prati & Ferretti, 2007b).

La scelta del corretto intervallo di variazione del campo di velocità dei bersagli radar può essere agevolata dalla visualizzazione dell'istogramma che riporta la distribuzione di frequenza dei valori di velocità registrati nel *dataset* di interesse, allo scopo di mettere in luce la variabilità dei valori di velocità registrati. Inoltre, gli estremi della scala di colore non devono essere eccessivamente ampi rispetto alla distribuzione dei valori di velocità, per evitare che la maggior parte dei punti ricada all'interno della classe centrale (verde) né, dall'altra parte, devono essere troppo ristrette. Infatti, benché riducendo gli estremi dell'intervallo si faciliti l'individuazione più dettagliata delle variazioni spaziali del fenomeno analizzato, bisogna tenere conto che non si può scendere al di sotto della risoluzione della tecnica utilizzata.

La più utilizzata rappresentazione dei bersagli radar ricavati mediante un'analisi multi-interferogramma, consiste nella loro classificazione in funzione della velocità media di spostamento e nell'uso di una scala di colori *standard*. In tale rappresentazione, la classe corrispondente ai punti considerati stabili viene generalmente rappresentata in verde, mentre le aree caratterizzate da deformazioni in allontanamento e in avvicinamento rispetto al sensore vengono rappresentate rispettivamente con le gradazioni tendenti al rosso e al blu (Fig. 37).

Generalmente, i valori di velocità di deformazione che delimitano la classe corrispondente ai punti considerati stabili, sono scelti pari a $\pm 1,5$ o ± 2 mm/anno. L'ampiezza di tale classe tuttavia dipende strettamente dalle caratteristiche delle immagini di partenza utilizzate per implementare l'analisi interferometrica, dalla sensibilità della tecnica utilizzata e dalle caratteristiche evolutive del fenomeno di interesse.



Fig. 37 - Distribuzione della velocità media dei *Permanent Scatterers* sul centro abitato di Roma, alla confluenza del torrente Grotta Perfetta con il fiume Tevere, classificati in base alla velocità media di deformazione registrata nel periodo 1992-2000 e visualizzati su foto aerea (Casagli et al., 2008a).

Se sono disponibili elaborazioni interferometriche di immagini acquisite sia lungo orbite ascendenti che discendenti, per distinguere le due informazioni è preferibile visualizzare i rispettivi punti di misura radar con una simbologia diversa o su immagini differenti (Fig. 38). Infatti, per la maggior parte dei fenomeni di instabilità di versante, i bersagli radar che si trovano su una stessa area ma derivano da orbite diverse (ascendente e discendente) possono avere delle notevoli differenze nel tasso di deformazione imputabili alla diversa linea di vista (cfr. 2.1.2). A differenza delle frane, i fenomeni interessati prevalentemente da movimenti verticali, come la subsidenza, registreranno deformazioni molto simili lungo le due diverse geometrie.

Nel caso in cui siano disponibili le analisi su entrambe le geometrie di acquisizione, per facilitare la comprensione dei fenomeni, è possibile visualizzare i bersagli radar mediante dei vettori di direzione uguale a quella della linea di vista (LOS) proiettata sull'orizzontale e di verso dato dal segno dello spostamento misurato (- allontanamento, + avvicinamento). In questo modo l'interpretazione diventa più intuitiva (Fig. 39).

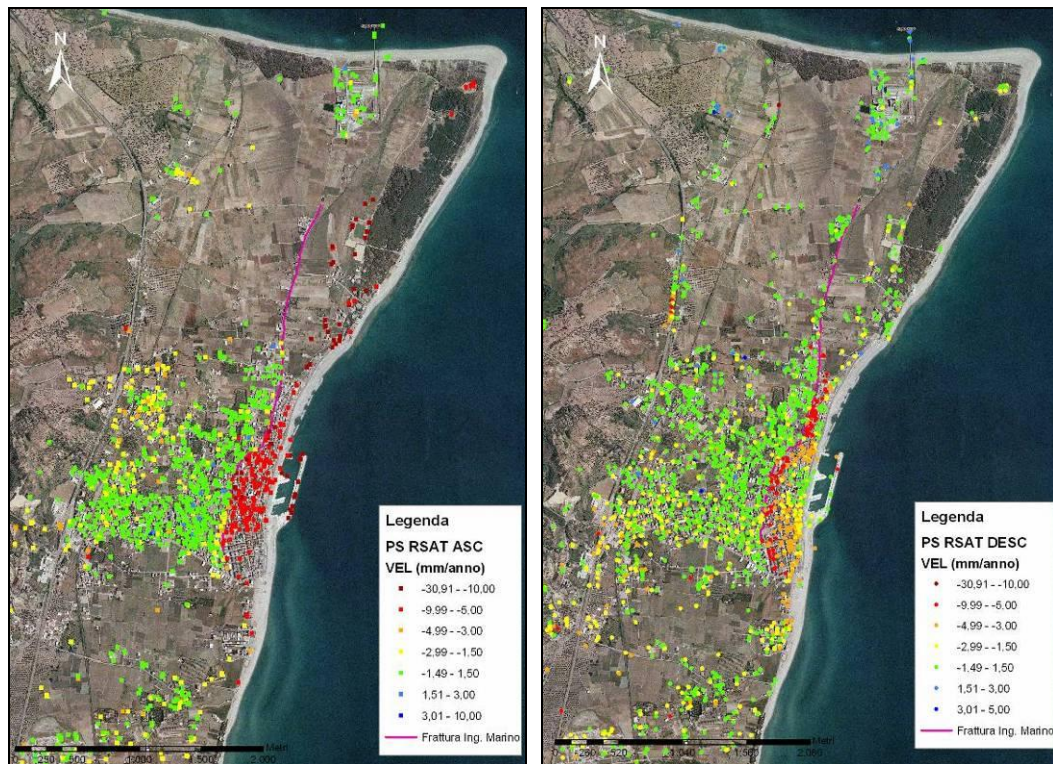


Fig. 38 - Distribuzione dei *Permanent Scatterers* RADARSAT ascendenti e discendenti sull'area di Cirò Marina (KT), classificati in base alla velocità media di deformazione nel periodo 2003-2005 (Casagli & Farina, 2006).



Fig. 39 - Bersagli radar ottenuti mediante elaborazione PS, visualizzati mediante vettori di direzione uguale a quella della LOS dei satelliti ERS1/2 proiettata sull'orizzontale e di verso dato dal segno della deformazione misurata (SLAM, 2005).

4.2 Controllo e omogeneizzazione delle misure

4.2.1 Reference point e scalatura delle misure

I risultati delle analisi multi-interferogramma necessitano del controllo del punto di riferimento scelto per implementare l'analisi del *dataset* e dell'eventuale scalatura delle misure. Tali attività sono necessarie perché le misure di deformazione fornite dalle analisi multi-interferogramma sono valutate in modo relativo, ovvero, vengono calcolate rispetto alla

posizione di un punto di riferimento a terra di coordinate note (*reference point*), supposto fermo o controllato mediante misure GPS o livellazione ottica.

Talvolta le misure di deformazione ottenute mediante le analisi interferometriche presentano un evidente *offset* nella misura delle velocità, indotto da movimenti cui è soggetto il *reference point* selezionato in fase di *processing*. In questi casi, è necessario procedere con la rimozione di tale *offset*, mediante la sua sottrazione a tutti i punti di misura appartenenti al *dataset* (Fig. 40). Chiaramente, la sottrazione del valore di velocità del *reference point* alle velocità medie di deformazione dei bersagli radar, modifica anche i valori di deformazione contenuti in ciascuna serie storica.

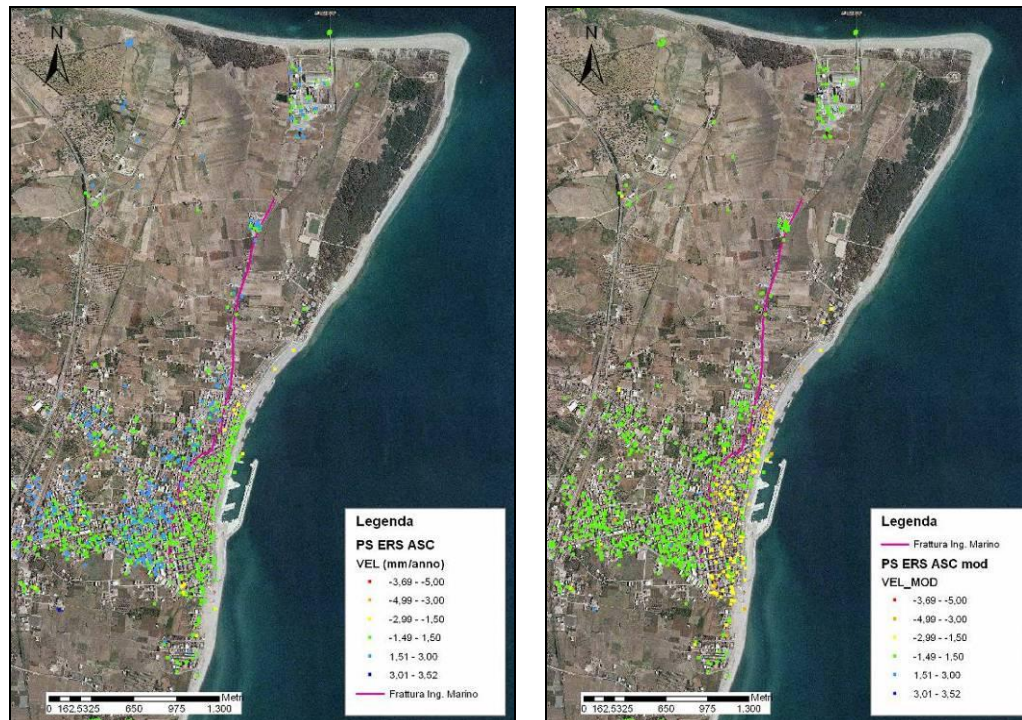


Fig. 40 - Confronto tra i PS ERS1/2 ascendenti relativi all'are di Cirò Marina (KT) prima (a sinistra) e dopo la rimozione dell'*offset* (a destra). I PS sono classificati in base alla velocità media e visualizzati su un'ortofoto (Casagli & Farina, 2006).

Nel caso in cui si proceda con il cambio di *reference point* in fase di *post-processing*, i valori di deviazione *standard* riferiti al vecchio punto di riferimento non sono più validi, infatti, tale cambio deteriora l'informazione contenuta nel valore di deviazione *standard*, pur non inficiando la qualità dell'informazione sulla velocità e sulle serie storiche di deformazione dei bersagli. È possibile ri-calcolare i nuovi valori approssimativi delle deviazioni *standard* tenendo conto della loro dipendenza dalla distanza dal nuovo punto di riferimento e della topografia dell'area in esame. Tuttavia, questi nuovi valori calcolati saranno soltanto indicativi e da utilizzare con maggiore cautela rispetto a quelli originali.

Una migliore alternativa rispetto al cambio del *reference point* in fase di *post-processing*, consiste nell'effettuare tale cambio in fase di *processing*. Ciò è svolto rielaborando il *dataset* di immagini radar disponibili e scegliendo durante l'analisi un punto di riferimento differente dal precedente.

Un altro fattore che provoca la necessità di scalare le misure, consiste nella presenza nell'area analizzata di fenomeni a larga scala, quali deformazioni regionali di origine tettonica. Tali deformazioni sono generalmente dell'ordine di pochi mm/anno, interessano zone abbastanza ampie e omogenee dal punto di vista geologico (ad esempio bacini intermontani) e si riflettono come piccoli *offset* sulla velocità di tutti i bersagli radar presenti in queste aree. Per effettuare un'analisi finalizzata all'identificazione di fenomeni franosi, tali *offset* non

costituiscono un problema, ma per far risaltare maggiormente le aree in frana è possibile valutare statisticamente il loro valore medio, analizzando la distribuzione di frequenza della velocità, e rimuoverlo.

4.2.2 Omogeneizzazione di dataset sovrapposti

I risultati delle analisi multi-interferogramma implementate su dati provenienti da diverse orbite (ascendenti e discendenti) o da *track* parzialmente sovrapposte (cfr. 2.1.2), necessitano dell'omogeneizzazione e della scalatura delle misure al fine di renderle tra loro confrontabili.

Le velocità fornite dall'analisi multi-interferometrica sono relative e non assolute, cioè sono velocità differenziali calcolate rispetto a un punto di riferimento interno all'area analizzata (cfr. 2.4). Dato che ciascun *dataset* possiede un proprio *reference point*, in corrispondenza di uno stesso bersaglio radar individuato nell'analisi di due *dataset* diversi (ma aventi una parte comune di sovrapposizione), si possono registrare velocità leggermente differenti. Questo può essere indotto dal fatto che i *reference point* non sono perfettamente fermi, ma sono affetti da un leggero movimento. È necessario quindi stimare quanto sia tale differenza, valutandola statisticamente su punti vicini e rimuoverla per rendere confrontabili i due diversi *dataset*.

Come è stato detto nella sezione 4.2.1, la fase di rimozione dell'*offset* dalle misure radar satellitari influisce sia sulle velocità medie di deformazione dei tutti i bersagli radar appartenenti al *dataset*, sia sulle loro serie storiche di deformazione.

4.3 Elaborazioni preliminari dei risultati

4.3.1 Interpolazione spaziale

Come già discusso, la distribuzione spaziale delle misure radar satellitari ottenute mediante un'analisi multi-interferogramma non è omogenea, infatti, le misure di deformazione sono effettuate soltanto in corrispondenza di alcuni bersagli radar selezionati in fase di elaborazione (cfr. 2.4). Per facilitare l'interpretazione dei fenomeni in atto ed estendere spazialmente l'informazione sulle deformazioni anche alle aree prive di bersagli radar, i dati puntuali di velocità media forniti dalle analisi A-DInSAR possono essere interpolati (Fig. 41).

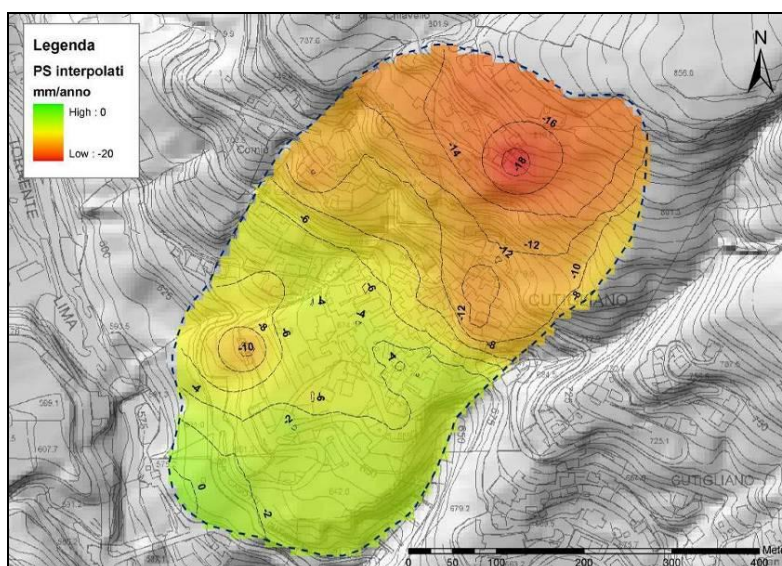


Fig. 41 - Mappa dei tassi di deformazione sulla frana di Cutigliano (PT) e curve di iso-velocità sovrapposte a *shaded relief* del versante, ottenute tramite interpolazione con IDW delle misure PS. La superficie derivante dall'interpolazione è stata ritagliata sui limiti dell'area definita instabile sulla base dell'analisi geomorfologica (Casagli et al., 2005).

Chiaramente, quest'operazione può essere eseguita soltanto nelle aree in cui:

- la densità e la distribuzione dei bersagli sono tali da potere essere considerati rappresentativi dell'area stessa;
- la tipologia di fenomeno analizzato è caratterizzata da una distribuzione spaziale delle deformazioni correlata nello spazio.

L'interpolazione delle velocità medie di deformazione può essere effettuata mediante appositi algoritmi implementati in ambiente GIS, quali l'IDW (*Inverse Distance Weighted*) o il *Kriging*.

L'IDW è basato sulla similarità tra punti vicini ed opera a livello locale su un cerchio di determinato raggio centrato sul punto da interpolare. Nella stima del valore di velocità interpolato, pesa il contributo dei bersagli radar intorno al punto di interesse con l'inverso della loro distanza rispetto al punto stesso. Il *Kriging* è un metodo di interpolazione spaziale che si basa invece sull'autocorrelazione della grandezza da stimare, cioè sull'assunzione che la grandezza in oggetto vari nello spazio con continuità. Il valore di velocità in un punto viene calcolato con una media pesata dei valori noti, utilizzando dei pesi che dipendono dalla relazione spaziale tra i valori misurati nell'intorno del punto stesso.

4.3.2 Proiezione delle misure su una data direzione

Se si conosce l'orientamento della prevalente direzione di deformazione che caratterizza il fenomeno in esame, è possibile proiettare su tale direzione le misure interferometriche eseguite lungo la LOS del satellite.

Nello studio di alcune tipologie di fenomeni di dissesto, può ad esempio essere ipotizzato che la principale componente di deformazione coincida con la direzione di massima pendenza del versante⁷ (scivolamenti di traslazione) o con la verticale (fenomeni di subsidenza e di *uplift*). In altri casi la reale direzione di deformazione di un'area può essere invece dedotta dai risultati di rilievi *in situ*, quali livellazione ottica o misure GPS.

La procedura di proiezione dei dati radar si basa sul calcolo della percentuale del reale vettore spostamento che il satellite è in grado di rilevare e sulla successiva scalatura della misura radar lungo la direzione reale di deformazione. La percentuale del reale vettore spostamento che il satellite è in grado di rilevare viene determinata a partire dai parametri di orientazione del vettore di deformazione e della linea di vista del satellite utilizzato. Tale grandezza corrisponde al coseno dell'angolo compreso tra la linea di vista (LOS) e il vettore spostamento (S), ricavabile effettuando il prodotto scalare tra i versori di orientazione dei due vettori (Fig. 42).

La proiezione delle misure radar lungo la direzione reale di deformazione risulta quindi pari al rapporto tra la misura di deformazione rilevata lungo la LOS del satellite e il coseno dell'angolo formato tra le due direzioni, calcolato precedentemente⁸:

$$V_{\underline{S}} = \frac{V_{\underline{LOS}}}{\cos \theta_{\underline{LOS-S}}} \quad (6)$$

⁷ L'assunzione di movimenti lungo la direzione di massima pendenza può non essere verosimile nel caso di superfici di scivolamento con marcato controllo geologico-strutturale (es. frane di roto-traslazione).

⁸ Come si evince dalle formule contenute nella Fig. 42, il valore del coseno dell'angolo $\theta_{\underline{LOS-S}}$ può assumere sia valori positivi che negativi. Se il valore di $\cos \theta_{\underline{LOS-S}}$ risulta minore di zero, significa che i due vettori, LOS ed S, sono separati nello spazio da un angolo θ maggiore di $\pm 90^\circ$.

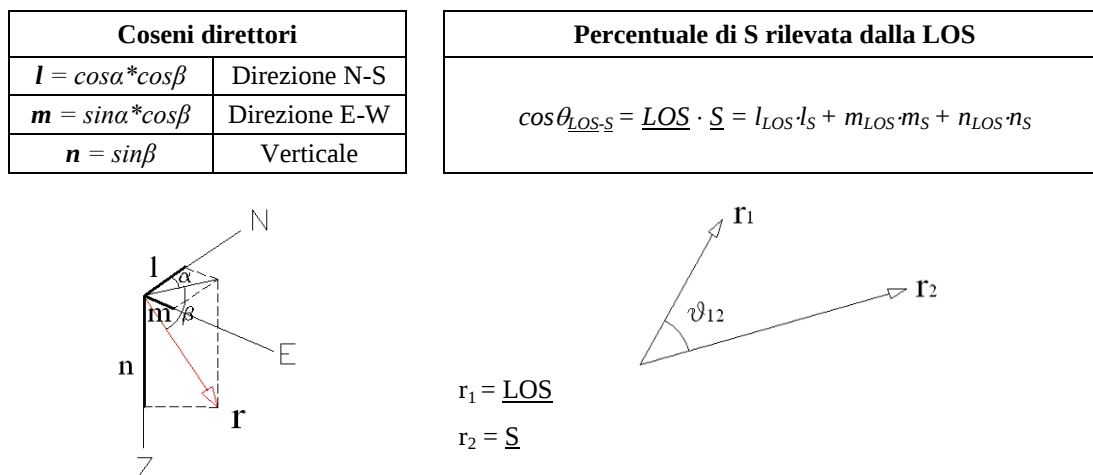


Fig. 42 - Determinazione dei coseni direttori di un versore ($\underline{r}$) e dell'angolo θ_{12} tra due versori di $\underline{S}$ e della LOS. Proiezione della misura radar di deformazione lungo la reale direzione di deformazione.

4.3.3 Combinazione delle misure ascendenti e discendenti

La quantità e la qualità delle informazioni ricavabili sul fenomeno analizzato migliorano sensibilmente se si hanno a disposizione elaborazioni multi-interferogramma eseguite su immagini acquisite sia lungo orbite ascendenti che discendenti.

L'osservazione della distribuzione nell'area di interesse delle velocità medie di deformazione calcolate da *dataset* di immagini acquisite in geometria ascendente e *dataset* acquisiti in geometria discendente, può infatti fornire un'indicazione sul cinematisimo in atto. Infatti, fenomeni di deformazione caratterizzati da prevalenti movimenti verticali, produrranno sulle elaborazioni ascendenti e discendenti una velocità media di deformazione molto simile (Fig. 43). Al contrario, le deformazioni caratterizzate da componenti prevalentemente orizzontali, produrranno misure di deformazione caratterizzate da velocità ascendenti e discendenti di verso opposto.

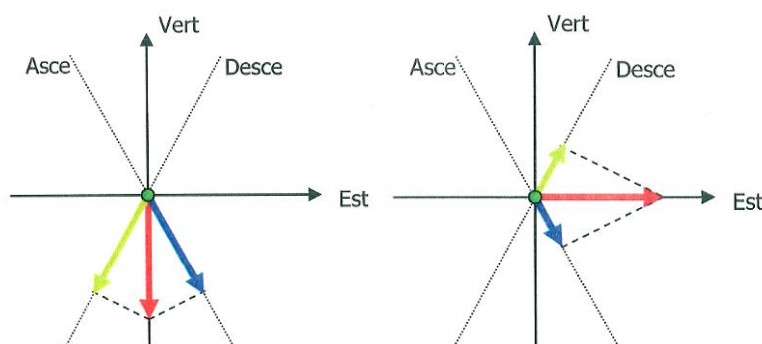


Fig. 43 - Esempio di moto reale puramente verticale (sinistra) e orizzontale (destra). In rosso è rappresentato lo spostamento reale, in blu e in verde le componenti di deformazione lette dalla geometria ascendente e discendente rispettivamente (TRE, 2008b).

Per le deformazioni caratterizzate da componenti molto variabili nello spazio, i caposaldi radar osservati con due diverse geometrie di vista, potranno dunque presentare notevoli differenze nel tasso di deformazione (Fig. 44).

Un'operazione molto utile che può essere implementata sui risultati di elaborazioni multi-interferogramma, consiste nella combinazione delle misure ottenute dall'elaborazione di dati acquisiti da uno stesso satellite nelle due diverse geometrie. Lo scopo di questa combinazione è

quello di stimare le componenti del vettore di deformazione nella direzione verticale e orizzontale E-W (Fig. 45).

In alternativa, se l'area da analizzare è di tipo montuoso si può utilizzare l'informazione di quota derivante da un modello digitale del terreno e si può scomporre il moto del bersaglio a terra nelle sue componenti parallela al versante e perpendicolare ad esso.

Come si è detto, la componente di deformazione N-S risulta invece difficilmente misurabile, poiché i sensori attualmente operativi seguono orbite orientate circa lungo i meridiani (cfr. 2.2).

Un ulteriore vantaggio legato alla disponibilità di dati acquisiti lungo entrambe le geometrie consiste nella possibilità di rilevare le deformazioni anche su quelle aree che non sono visibili per mezzo di una sola geometria.

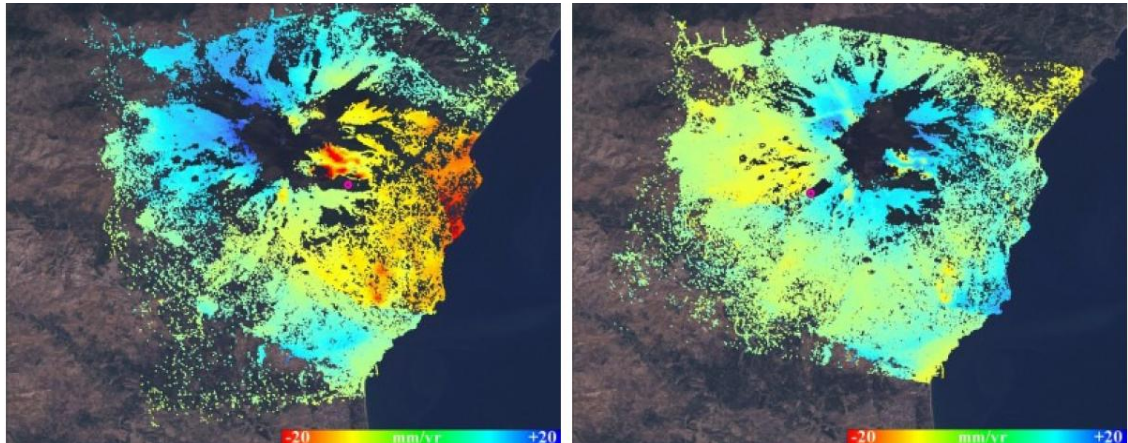


Fig. 44 - Confronto tra velocità medie di deformazione rilevate lungo orbite ascendenti (sinistra) e discendenti (destra) dai satelliti ERS1/2 sull'Etna (Sicilia) dal 1995 al 2000 (TRE, 2008b).

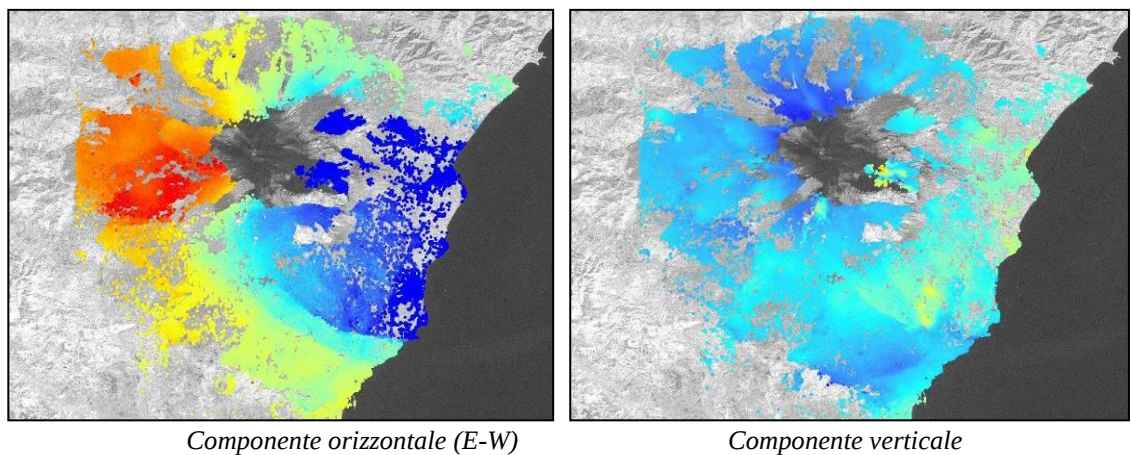


Fig. 45 - Scomposizione delle deformazioni registrate lungo la LOS nel periodo 1995-2000 dai satelliti ERS1/2 sull'Etna (Sicilia), secondo la direzione orizzontale (E-W) e verticale. L'analisi ha permesso di identificare l'orientazione prevalente del moto in modo più agevole, mettendo in risalto le aree in cui una componente di deformazione prevale sull'altra (TRE, 2008b).

In generale, per effettuare la combinazione delle due geometrie di acquisizione e stimare la componente orizzontale E-W e verticale del moto di un bersaglio, è necessario che il punto considerato risulti individuato dall'analisi multi-interferometrica come un bersaglio radar in entrambe le geometrie.

Nella pratica, la condizione che le due geometrie di acquisizione identifichino a terra lo stesso bersaglio radar spesso non è verificata. Per implementare la scomposizione del moto

prima descritta è dunque necessario procedere con un ricampionamento dei bersagli radar secondo una griglia a maglia regolare.

Dal punto di vista operativo, l'area di interesse viene suddivisa in celle di lato 50 o 100 metri e, a ciascuna di esse e per entrambe le geometrie, viene assegnata la media dei valori di velocità di deformazione dei bersagli radar che ricadono all'interno della cella (Fig. 46).

I valori di velocità registrati lungo le orbite ascendenti, V_a , e discendenti, V_d , sono poi combinati geometricamente per ottenere le velocità lungo la direzione verticale, V_v , e orizzontale E-W, V_E . Ipotizzando che la velocità orizzontale di deformazione sia trascurabile in direzione N-S, la V_v e la V_E si ottengono attraverso la risoluzione, *pixel a pixel*, del seguente sistema:

$$\begin{cases} V_a = V_v \sin \beta_a - V_E \sin \alpha_a \cos \beta_a \\ V_d = V_v \sin \beta_d - V_E \sin \alpha_d \cos \beta_d \end{cases} \quad \text{oppure} \quad \begin{cases} V_a = V_v \cos \theta_a - V_E \sin \alpha_a \sin \theta_a \\ V_d = V_v \cos \theta_d - V_E \sin \alpha_d \sin \theta_d \end{cases}$$

in cui il significato delle grandezze α_a , α_d , β_a , β_d , (definite nella Fig. 42) e θ_a , θ_d , (convenzionalmente, assunte tutte positive) è il seguente:

α_a = azimuth della LOS ascendente; α_d = azimuth della LOS discendente;

β_a = inclinazione della LOS ascendente; β_d = inclinazione della LOS discendente;

θ_a = angolo di vista⁹ della LOS ascendente; θ_d = angolo di vista della LOS discendente.

Chiaramente, se le due LOS lungo le quali sono eseguite le misure appartengono ad uno stesso satellite e sono relative alla stessa modalità di acquisizione (es. entrambe in *Fine Beam* di RADARSAT-1), gli angoli β_a e β_d , così come gli angoli θ_a e θ_d , risulteranno uguali.

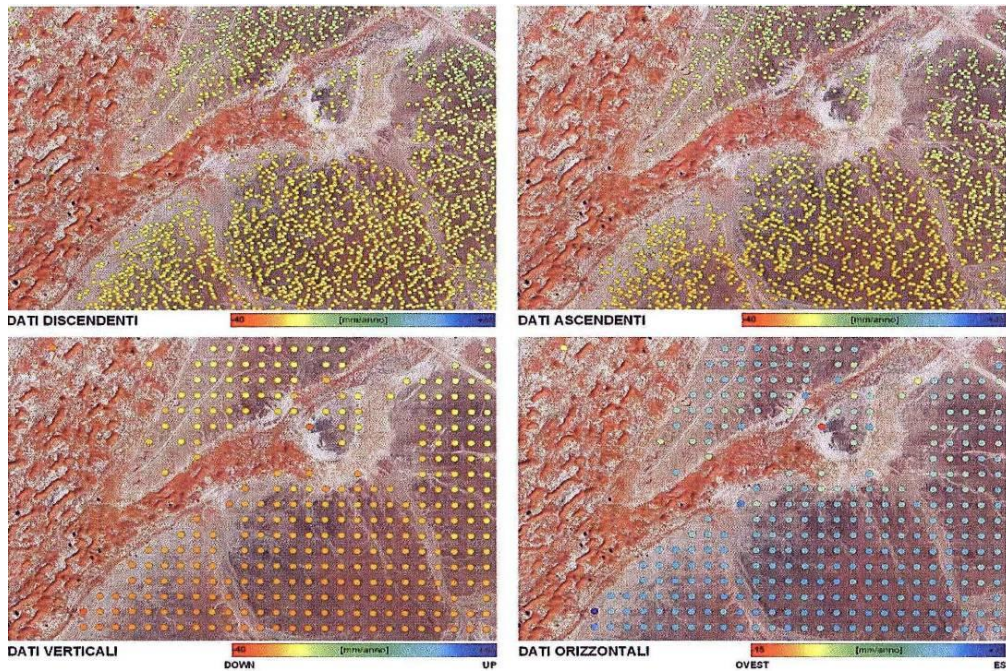


Fig. 46 - Esempio di scomposizione del moto in componente orizzontale E-W e verticale su griglia regolare (TRE, 2008b).

⁹ L'angolo di vista θ (cfr. 2.2) e l'angolo β utilizzato per il calcolo dei coseni direttori delle LOS ascendente e discendente, sono complementari: $\beta = 90^\circ - \theta$. Infatti, θ è l'angolo formato dalla congiungente sensore-bersaglio (LOS) e la verticale, invece β è l'angolo compreso tra la LOS e l'orizzontale.

4.4 Valutazione della sensibilità delle misure

La valutazione della sensibilità delle misure comprende alcune attività finalizzate allo studio dell'applicabilità delle misure interferometriche per il controllo delle deformazioni che evolvono nell'area di interesse.

La valutazione della sensibilità della tecnica e dell'applicabilità delle misure è effettuata elaborando le informazioni relative alla morfologia dell'area analizzata, alla linea di vista del sensore utilizzato (cfr. 2.2) e ad alcune considerazioni sulla probabile direzione dei fenomeni deformativi di interesse.

Queste attività non coinvolgono dunque in modo diretto i risultati delle analisi interferometriche, ma le caratteristiche dei dati elaborati, delle aree e dei fenomeni che si vogliono controllare. Per tale ragione, questo tipo di analisi appartengono generalmente alle valutazioni da condurre in fase di pre-elaborazione. Tuttavia, la loro implementazione in fase di post-elaborazione rappresenta uno strumento fondamentale per comprendere l'affidabilità e la concretezza delle misure registrate e per analizzare la qualità delle informazioni ottenute mediante le analisi interferometriche.

4.4.1 Sensibilità della tecnica

Le tecniche interferometriche consentono di misurare la componente della deformazione relativa alla direzione che congiunge il sensore con il bersaglio a terra, ovvero la linea di vista del satellite (LOS). Quanto più la direzione del vettore di deformazione reale si discosta dalla linea di vista, tanto minore è la componente di deformazione rilevata dal satellite e, al limite, nel caso di deformazione che si sviluppa con direzione perpendicolare alla LOS, il valore misurato risulta nullo.

Nella Fig. 47 è schematizzata la variabilità della componente di deformazione misurata per mezzo dell'interferometria radar in funzione dell'orientazione della direzione reale di deformazione.

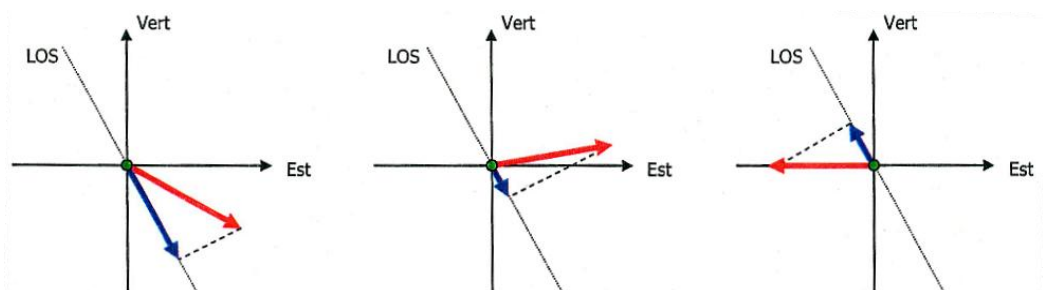


Fig. 47 - Componente di deformazione rilevabile dal sensore radar (in blu) in funzione della direzione reale (in rosso) di deformazione del bersaglio (TRE, 2008b).

Per conoscere quale sia la sensibilità della tecnica nel misurare le deformazioni rispetto alle loro possibili direzioni nello spazio, possono essere calcolati i coseni direttori della linea di vista del satellite da cui sono state acquisite le immagini elaborate.

Per illustrare la procedura da seguire, si riportano a titolo di esempio le analisi di sensibilità eseguite nei riguardi della LOS dei satelliti ERS1/2 ed ENVISAT e del satellite RADARSAT-1 in modalità *Standard Beam* e *Fine Beam* (cfr. 2.2), rispetto alle direzioni N-S, E-W e alla verticale (Fig. 48 e Tabella 9).

Questa tipologia di analisi mette in luce come i movimenti verticali siano rilevati quasi integralmente nelle geometrie di acquisizione analizzate e gli spostamenti orizzontali in direzione E-W solo parzialmente. Movimenti a prevalente direzione N-S sono invece poco visibili con entrambe le linee di vista.

Come si vede dalla Tabella 9, al variare dell'angolo di vista, θ , varia significativamente la sensibilità della LOS nei confronti della misura delle deformazioni di direzione verticale e

orizzontale. Ad esempio, utilizzando la modalità *Fine Beam* di RADARSAT-1, si lavora con un angolo di vista più elevato rispetto alla modalità *Standard Beam* e si ottiene una maggiore sensibilità nei confronti delle componenti orizzontali delle deformazioni, a scapito della sensibilità nei confronti delle componenti di deformazione verticali.

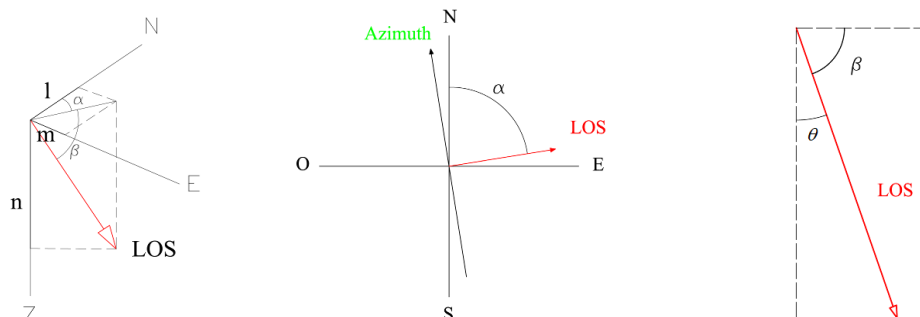


Fig. 48 - Determinazione dei coseni direttori della LOS (in rosso).

	ERS1/2 o ENVISAT		RADARSAT-1			
			Standard Beam		Fine Beam	
	Ascendente $\alpha=81,5^\circ$ $\beta=67^\circ$	Discendente $\alpha=278,5^\circ$ $\beta=67^\circ$	Ascendente $\alpha=81,5^\circ$ $\beta=55^\circ$	Discendente $\alpha=278,5^\circ$ $\beta=55^\circ$	Ascendente $\alpha=81,5^\circ$ $\beta=48^\circ$	Discendente $\alpha=278,5^\circ$ $\beta=48^\circ$
Direzione N-S $ l = \cos\alpha \cdot \cos\beta $	5,8 %		8,5 %		9,9 %	
Direzione E-W $ m = \sin\alpha \cdot \cos\beta $	38,6 %		56,7 %		66,2 %	
Direzione verticale $ n = \sin\beta $	92,1 %		81,9 %		74,3 %	

Tabella 9 - Sensibilità della LOS dei satelliti ERS1/2, ENVISAT (*IS2 mode*) e RADARSAT-1 (*Standard Beam* e *Fine Beam mode*) nei confronti delle diverse direzioni di movimento.

4.4.2 Moti monitorabili

In aree montuose, al fine di valutare quale sia l'entità della componente di spostamento misurata con la tecnica interferometrica utilizzata e comprendere il significato e la bontà dei risultati ottenuti, bisogna analizzare l'esposizione del versante in analisi.

Se è possibile ipotizzare che gli spostamenti che avvengono nell'area in esame siano caratterizzati da una componente principale diretta secondo la linea di massima pendenza del versante, per le zone in cui l'esposizione è vicina alla perpendicolare alla LOS del satellite, la componente del vettore spostamento misurabile per mezzo dell'interferometria è piuttosto bassa. Per tale ragione è spesso necessario verificare l'eventuale presenza di zone in cui l'esposizione può mascherare eccessivamente la reale entità dello spostamento avvenuto nei periodi esaminati. A tale scopo può essere ricavata la mappa dell'esposizione relativa all'area oggetto di studio, a partire da un DTM di risoluzione adeguata.

In relazione alle caratteristiche di orientazione della LOS del sensore utilizzato, possono essere evidenziate le aree in cui l'esposizione del versante in esame si avvicina alla direzione perpendicolare alla linea di vista del satellite, creando una banda di incertezza attorno alla direzione di *azimuth* (Fig. 49).

Il risultato ottenuto è una maschera che dà indicazione delle porzioni dei versanti in cui le misure fornite dalla tecnica possono subire una notevole riduzione se la direzione di deformazione è orientata lungo la massima pendenza del versante stesso (Fig. 50).

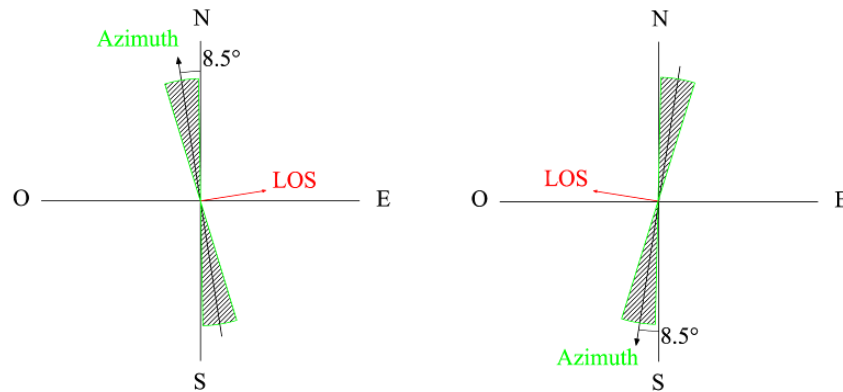


Fig. 49 - Esempio di bande di incertezza a cavallo della direzione di *azimuth* (perpendicolare alla LOS), per la geometria ascendente e discendente.

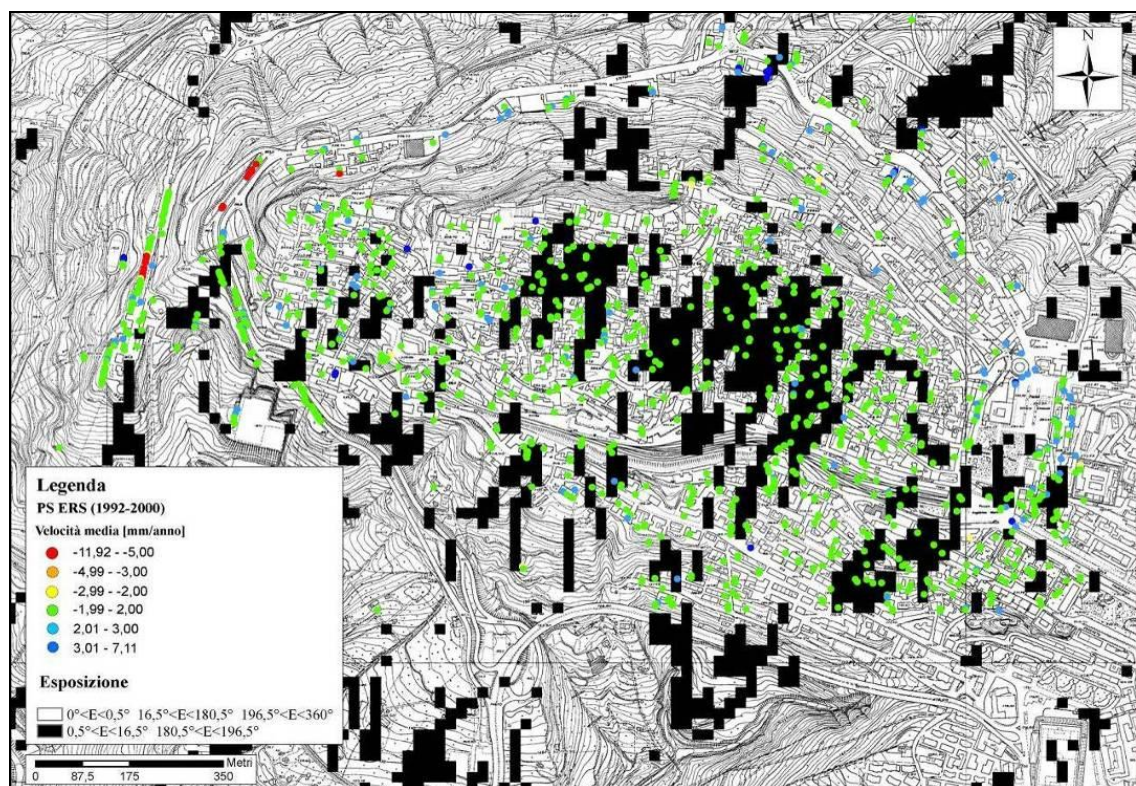


Fig. 50 - Maschera di sensibilità della tecnica PS nei confronti del dataset ERS1/2 discendente sul centro abitato di Agrigento. Le aree in nero sono quelle la cui esposizione assume valori prossimi alla perpendicolare alla linea di vista e per le quali le misure possono subire una notevole riduzione se la direzione di deformazione è orientata lungo la massima pendenza del versante.

4.4.3 Aree monitorabili

Benché la copertura spaziale delle informazioni contenute all'interno di una immagine satellitare sia uniforme, l'implementazione delle tecniche di interferometria comporta l'estrazione di informazioni sulle deformazioni superficiali subite dal terreno soltanto in corrispondenza di zone ad alta coerenza (cfr. 2.3) o su bersagli stabili nel tempo nei confronti del segnale radar (cfr. 2.4). La distribuzione delle aree in cui tali misure di deformazione possono essere effettuate, dipende in primo luogo dall'uso del suolo, infatti, la presenza di strutture antropiche o bersagli naturali molto riflettenti quali le rocce esposte, favorisce durante l'elaborazione dei dati l'individuazione di numerosi punti di misura radar.

Un altro fattore di cui tenere conto consiste nella presenza all'interno delle immagini radar delle deformazioni prospettiche causate dalla geometria di acquisizione dei sistemi radar satellitari e dalla topografia del terreno (cfr. 2.1.1). Ciò comporta che la reale copertura dell'area analizzata con i risultati di un'analisi interferometrica non è uniforme, infatti, la presenza dei fenomeni di *layover*, *foreshortening* o di *shadowing* provoca la sovrapposizione o l'assenza di segnali in alcune aree della scena.

Una recente esperienza condotta da TRE in collaborazione con l'ARPA Piemonte (Colombo et al., 2006), ha mostrato che tramite la proiezione di un DTM nel sistema di coordinate SAR e l'analisi di visibilità del radar è possibile individuare agevolmente le aree in *layover* o *shadowing* (Fig. 51) rispetto alle diverse linee di vista dei satelliti. In aggiunta, attraverso l'analisi combinata con le caratteristiche d'uso del suolo, si può ricavare una mappatura della probabilità di identificazione di bersagli radar. Tale metodologia, sebbene presenti un'accuratezza legata alla scala di dettaglio dei *dataset* utilizzati per implementare le analisi, consente di valutare in maniera speditiva la possibilità di identificare punti di misura radar sull'area di interesse.

In fase di pre-elaborazione, la mappatura delle aree monitorabili guida l'utente nella scelta dell'area da monitorare e della tipologia di analisi da eseguire. In fase di post-elaborazione, essa può invece diventare uno strumento per individuare e analizzare criticamente le aree in cui, benché i fenomeni siano predisposti a essere monitorati con le tecniche interferometriche, le caratteristiche evolutive del campo deformativo hanno ostacolato l'identificazione di bersagli stabili.

Come discusso nella sezione 2.4, la mancata identificazione di bersagli radar può essere infatti legata ad esempio alla presenza di movimenti rapidi che provocano forte decorrelazione temporale del segnale.

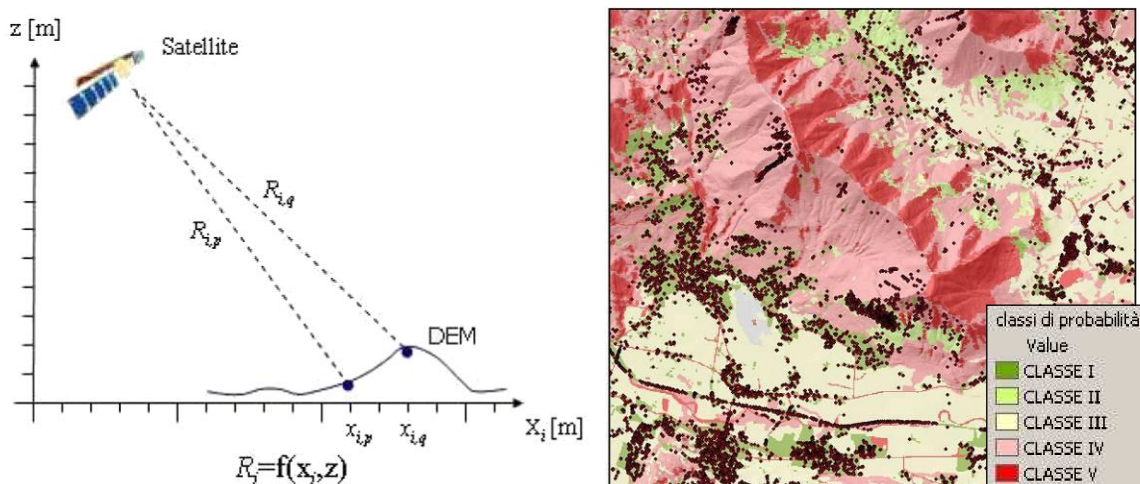


Fig. 51 - Trasformazione del DTM in coordinate SAR, esempio di sezione elaborata in Matlab e zonizzazione del territorio in base alla probabilità di identificarvi bersagli radar mediante l'implementazione di tecniche multi-interferometriche. In rosso sono rappresentate le aree a più bassa probabilità, in verde quelle a probabilità maggiore. I PS sono sovrapposti alla mappa delle aree monitorabili (Colombo et al., 2006).

5 RADAR-INTERPRETAZIONE

All'interno di questo capitolo sono descritte e discusse in dettaglio le diverse fasi e procedure di radar-interpretazione.

Il termine 'radar-interpretazione', la cui definizione è stata introdotta da Farina et al. nel 2008 e recentemente ampliata da Cigna et al. (under review; cfr. allegato), comprende l'uso combinato delle analisi InSAR e delle tecniche convenzionali per lo studio dei fenomeni di dissesto (Fig. 52). Tale attività è finalizzata alla formulazione di una valutazione di sintesi sul dissesto in esame, generata da un'analisi accurata e completa del fenomeno e basata sull'integrazione delle misure InSAR (differenziali e multi-immagine) con i dati ancillari (mappe topografiche, DTM, carte geologiche e geomorfologiche, ecc.) e la convenzionale fotointerpretazione di immagini ottiche (aeree e satellitari).

L'interpretazione dei dati InSAR e PSI richiede il supporto derivante dall'analisi e dall'integrazione di misure rilevate con la strumentazione a terra e con i dati ancillari a causa delle caratteristiche intrinseche delle misure di deformazione ottenute, quali la capacità di rilevare soltanto la componente del movimento superficiale lungo la linea di vista del satellite e la distribuzione non continua nello spazio delle misure di deformazione rilevate (cfr. 2.4).

La radar-interpretazione permette di portare avanti analisi di fenomeni a diverse scale spaziali e temporali (es. mappatura di frane a scala regionale, monitoraggio di un singolo fenomeno a scala locale; cfr. 3.4) e rappresenta uno strumento fondamentale per estrarre informazioni sia sulla tipologia, sull'estensione e sulle cause dei fenomeni analizzati, sia sulla loro evoluzione temporale (Cigna et al., 2010b; cfr. allegato).

Nelle sezioni che seguono, è descritto e discusso in dettaglio il contributo fornito dalla radar-interpretazione dei dati radar satellitari nei confronti delle seguenti tipologie di analisi o ambiti applicativi (Fig. 52):

- Individuazione e inventario dei fenomeni di dissesto
- Caratterizzazione temporale e spaziale
- Mappatura rapida e valutazione del rischio residuo
- Monitoraggio e sorveglianza

Così come sarà messo in luce nelle sezioni che seguono, in relazione allo scopo dell'analisi e alla scala spaziale e temporale del fenomeno analizzato, la radar-interpretazione è strutturata in fasi differenti e permette di ottenere diverse informazioni e prodotti.

Per ciascuna delle suddette analisi, sono presentate e descritte una o più applicazioni implementate su aree test, appositamente selezionate per le loro caratteristiche geologiche e geomorfologiche, nonché per la tipologia di fenomeni da cui le stesse sono interessate e per la diversità e varietà dei loro *trend* deformativi caratteristici. (Fig. 53). In tal modo è possibile analizzare l'applicabilità delle suddette metodologie, nonché valutare la loro esportabilità, flessibilità e scalabilità per l'analisi di fenomeni relativi a diversi contesti ambientali.

I risultati di tutte le sperimentazioni condotte nell'ambito della presente ricerca sono successivamente discussi e integrati all'interno della sezione 6.

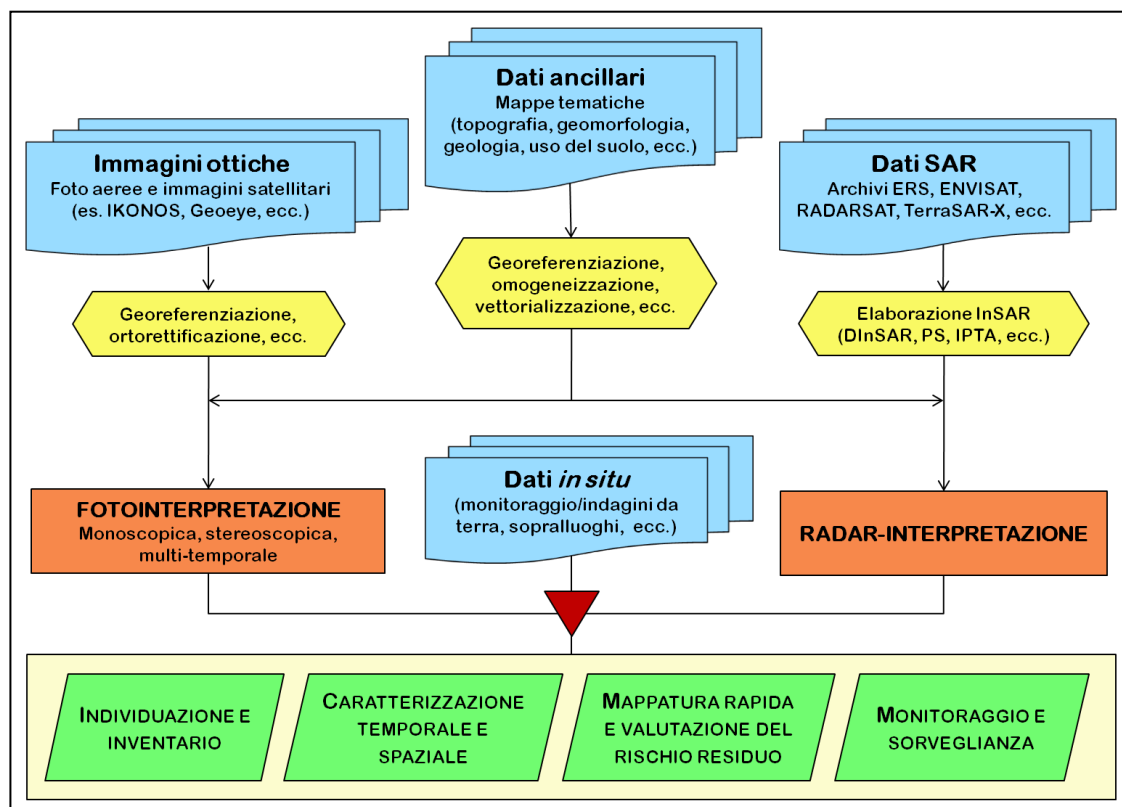


Fig. 52 - Schematizzazione del principio di radar-interpretazione dei dati SAR satellitari per l'analisi dei fenomeni di dissesto.

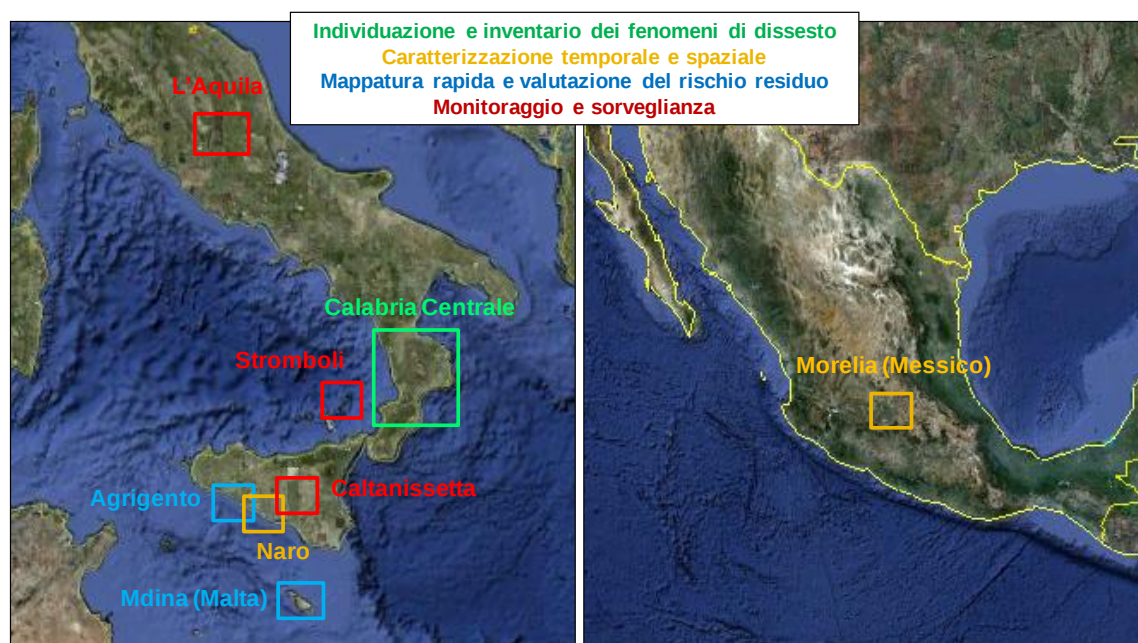


Fig. 53 - Aree test analizzate nell'ambito della ricerca, suddivise per tipologia di analisi implementata.

5.1 Individuazione e inventario dei fenomeni di dissesto

L'individuazione e l'inventario dei fenomeni di dissesto costituiscono la base per tutte le valutazioni e le attività connesse alla gestione e alla mitigazione del rischio. Il prodotto finale di tali attività consiste nella perimetrazione di tutti i fenomeni che interessano l'area analizzata (es. frane, subsidenze, sprofondamenti) e nella creazione e aggiornamento delle mappe inventario.

Le analisi eseguite per l'individuazione e inventario dei fenomeni, si riferiscono e possono essere applicate sia alla scala regionale, sia alla scala del singolo fenomeno di dissesto.

Il principale strumento in fase di individuazione dei fenomeni di dissesto è costituito dalla fotointerpretazione, ovvero l'interpretazione delle foto aeree e delle immagini ottiche satellitari. Il tradizionale utilizzo di tali dati in configurazione stereoscopica o la loro proiezione sul DTM, permette di effettuare la mappatura dei fenomeni di dissesto idrogeologico, attraverso l'individuazione delle geometrie di eventuali aree soggette a deformazione. L'analisi delle foto aeree o delle immagini ottiche satellitari, insieme alla morfologia deducibile dalle curve di livello e dall'immagine in *shaded relief* dell'area, può inoltre evidenziare la presenza di indicatori di movimento o addirittura una possibile forma dell'area instabile. In aggiunta, le condizioni della copertura vegetale e la presenza di anomalie al suo interno possono essere degli indicatori di movimento.

Le tecniche di telerilevamento satellitare, sia InSAR convenzionali sia multi-interferometriche, grazie alle caratteristiche di precisione, continuità, copertura areale e multi-temporalità delle riprese, possono supportare le metodologie convenzionali, per l'individuazione dei dissesti, lo studio della loro evoluzione nel tempo e per la valutazione della loro estensione areale. Applicazioni condotte su aree di elevata estensione, finalizzate alla perimetrazione di fenomeni franosi a livello regionale, hanno mostrato un'ottima complementarità tra i risultati di analisi PSI e quelli ottenuti tramite il tradizionale approccio geologico-geomorfologico. Grazie alla disponibilità di informazioni sull'evoluzione temporale del territorio, ottenute tramite l'implementazione su lunghi *dataset* di immagini satellitari ricoprenti almeno un decennio, è stato infatti possibile verificare la perimetrazione dei fenomeni e definirne il grado di attività in base alle velocità di deformazione superficiale rilevate. Tale disponibilità di dati è fondamentale soprattutto per lo studio di fenomeni lenti, la maggior parte dei quali non presenta indizi di movimento osservabili sul terreno. In tali casi, senza l'apporto del dato PSI si sarebbe dovuta installare una rete di monitoraggio appropriata su ciascun fenomeno di interesse e sarebbero state necessarie campagne di misura di medio-lungo periodo.

5.1.1 Metodologia

La metodologia descritta di seguito è basata sulla possibilità di utilizzare le misure di spostamento fornite da analisi multi-interferogramma, per l'individuazione dei dissesti idrogeologici e per l'aggiornamento di una mappa inventario delle frane realizzata mediante analisi geomorfologiche convenzionali (es. Casagli et al. 2008; Pancioli et al. 2008; Pancioli & Casagli, 2008; Righini et al., 2008; Herrera et al. 2009; Cigna et al., 2010a; cfr. allegato). In particolare, tale metodologia utilizza la radar-interpretazione di dati PSI, combinata con la convenzionale fotointerpretazione di immagini ottiche aeree e satellitari, per l'identificazione dei dissesti e l'analisi delle loro caratteristiche spazio-temporali. Tale approccio, schematizzato all'interno della Fig. 54 è composto dalle seguenti fasi:

- Individuazione e perimetrazione di aree in movimento
- Valutazione dello stato di attività e intensità dei fenomeni
- Aggiornamento di mappe inventario

Ciascuna delle suddette fasi sarà descritta e discussa all'interno delle sezioni seguenti.

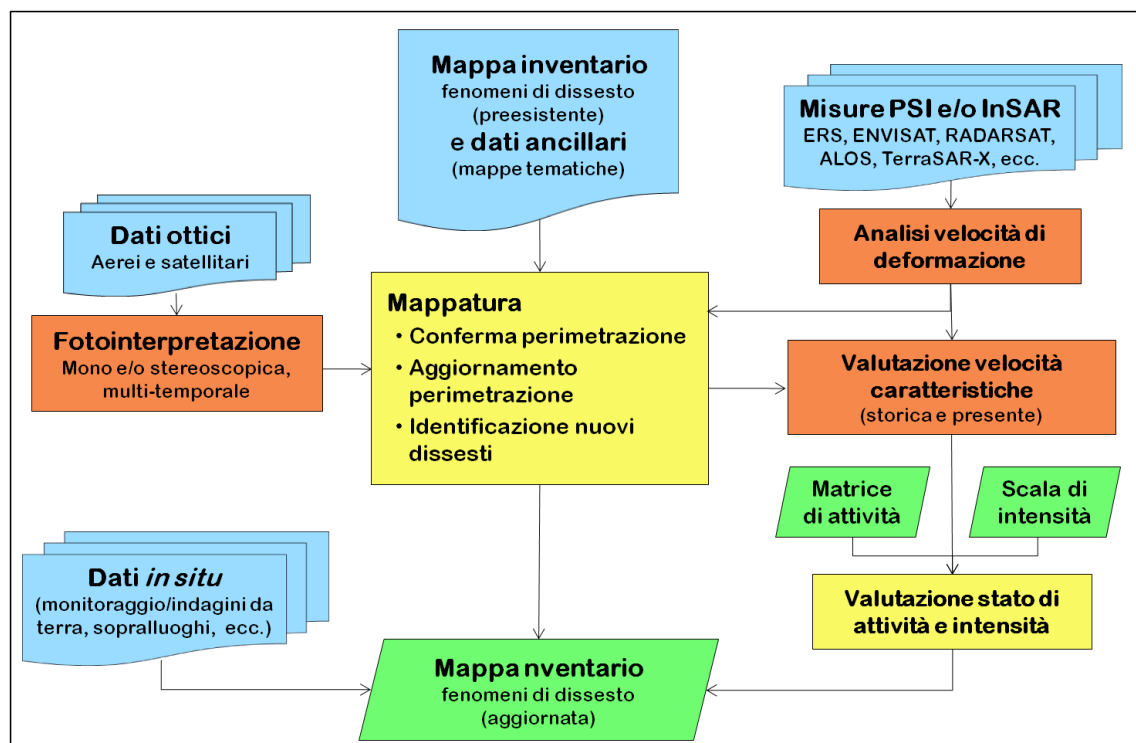


Fig. 54 - Principio di funzionamento della metodologia di radar-interpretazione per l'individuazione e inventario dei fenomeni di dissesto.

5.1.1.1 Individuazione e perimetrazione di aree in movimento

Nelle applicazioni delle tecniche multi-interferogramma a scala regionale, generalmente vengono sfruttate le informazioni sulla velocità media annuale di deformazione registrate in corrispondenza dei bersagli individuati sull'area di interesse. I *trend* deformativi medi registrati nel periodo coperto dalle acquisizioni, permettono infatti di rilevare la presenza di aree in movimento, effettuare la loro perimetrazione e inoltre determinare lo stato di attività e l'intensità dei fenomeni individuati (Fig. 54).

La radar-interpretazione mirata all'individuazione delle aree in movimento ha inizio con l'estrapolazione spaziale delle informazioni ricavate con le analisi multi-interferogramma. Dal punto di vista operativo, si procede secondo le seguenti fasi:

- Visualizzazione e classificazione dei risultati dell'analisi multi-interferometrica in funzione della velocità di deformazione, secondo le modalità e i criteri di classificazione descritti all'interno della sezione 4.1.
- Controllo del reference point ed eventuale scalatura dei risultati, secondo i criteri descritti all'interno della sezione 4.2.1.
- Omogeneizzazione delle misure per rendere confrontabili i dati provenienti da diverse orbite (ascendenti e discendenti) o da *track* parzialmente sovrapposte. Le modalità e i criteri relativi a questa fase sono descritti all'interno della sezione 4.2.2.
- Per ottenere informazioni utili all'identificazione di aree instabili, si procede con la sovrapposizione dei dati radar alla cartografia di base, alle mappe inventario preesistenti e ai prodotti di elaborazione dei dati ancillari, quali la mappa delle pendenze o dell'esposizione (Fig. 55).

Le informazioni contenute in alcuni dei dati ancillari, quali le carte topografiche, il DTM e le immagini ottiche, costituiscono infatti la base di partenza indispensabile per portare avanti la radar-interpretazione, poiché esse sono necessarie quali supporto cartografico e ottico per poter identificare possibili morfologie o caratteristiche del terreno connesse ai

movimenti superficiali ed estendere così spazialmente l'informazione puntuale fornita dall'analisi multi-interferogramma.

Le carte topografiche di base a scala sufficientemente grande (1:10.000/1:5.000, come le CTR), oltre a fornire da supporto per la visualizzazione dei risultati dell'analisi satellitare, permettono di valutare eventuali curvature planari del versante quali concavità e convessità e segnalano scarpate o terrazzi, che rappresentano possibili indicatori di aree instabili.

Alcuni dei dati ancillari, quali il modello digitale del terreno dell'area di interesse, possono essere elaborati per generare alcuni prodotti fondamentali per l'interpretazione.

Da un DTM è possibile produrre ad esempio la mappa delle pendenze, la mappa dell'esposizione, la curvatura dei versanti, l'area drenata e immagini di *shaded relief* (rilievo ombreggiato), utili nelle fasi interpretative per risalire alla direzione di movimento e riconoscere le aree interessate dalle deformazioni (Fig. 55).

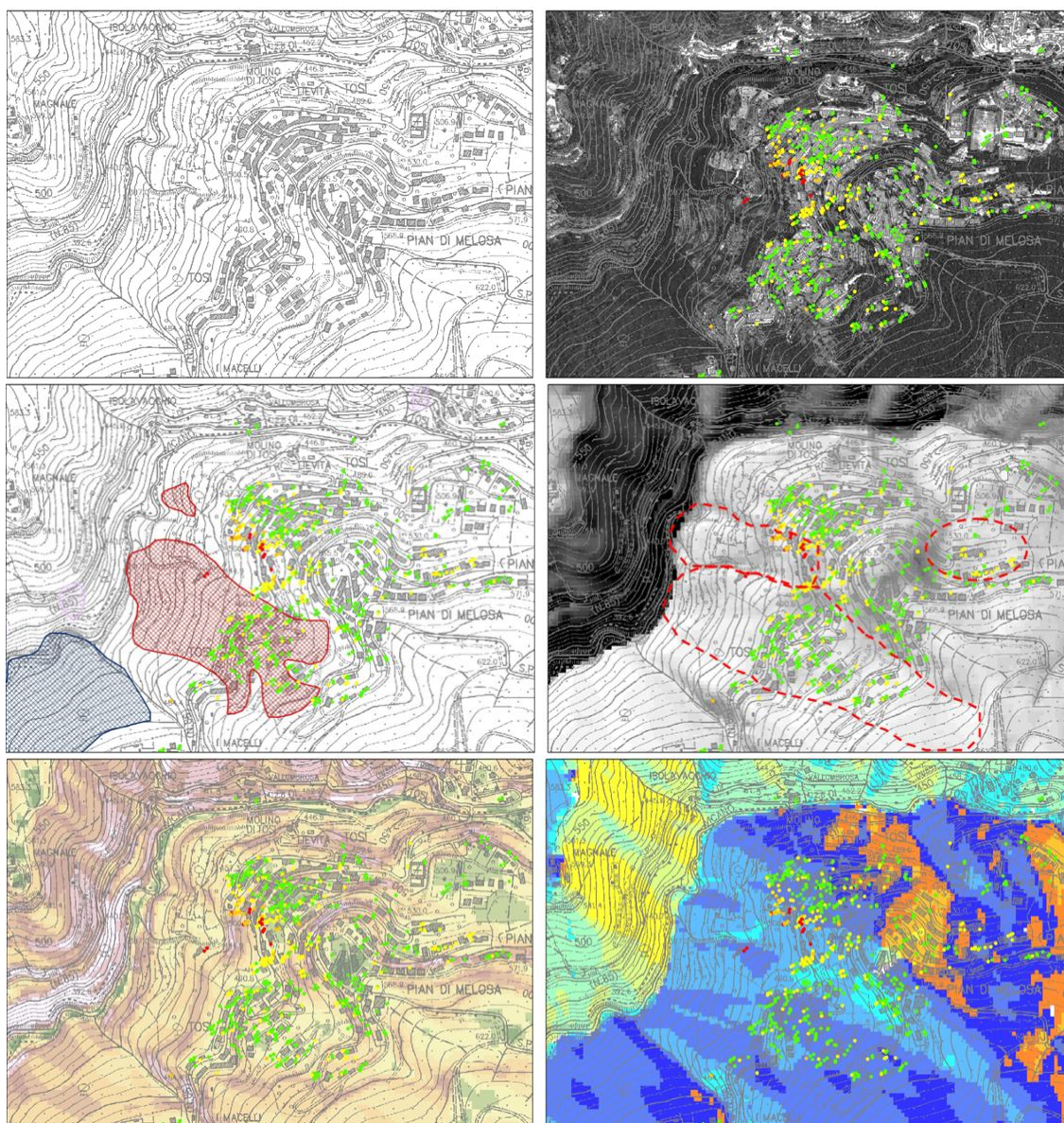


Fig. 55 - Carta topografica; foto aerea con bersagli radar e curve di livello; bersagli radar sovrapposti alla mappa inventario; immagine in *shaded relief* con bersagli radar e possibili corpi di frana; mappa delle pendenze e bersagli radar; mappa dell'esposizione dei versanti e bersagli radar (SLAM, 2005).

In relazione all'individuazione dei fenomeni franosi, la mappa delle pendenze dei versanti è utile per evidenziare possibili anomalie nella morfologia o riconoscere nel versante eventuali accumuli di frana, caratterizzati da bassi valori di pendenza, e nicchie di distacco, rappresentate da bruschi incrementi del gradiente.

La mappa dell'esposizione dei versanti è invece generalmente necessaria per comprendere il significato del segno delle misure radar satellitari ottenute per mezzo di un'analisi interferometrica, infatti, quando le curve di livello non sono sufficienti per comprendere la direzione di esposizione del versante risulta conveniente aiutarsi con i valori di esposizione.

Le immagini di *shaded relief* sono immagini della topografia con falsa illuminazione del sole, create per generare ombre che mettano in evidenza le possibili geometrie dei fenomeni, quali la forma e l'estensione di eventuali corpi di frana.

Un ulteriore utilizzo del DTM consiste nella proiezione su di esso degli altri dati ancillari quali foto aeree o immagini da satellite o i dati radar satellitari, per ottenere delle rappresentazioni 3D facilmente interpretabili.

- Analisi della distribuzione spaziale delle velocità medie di spostamento rilevate mediante un'analisi multi-interferogramma.

Questa attività fornisce spesso una chiara informazione sulla presenza o l'assenza di fenomeni di deformazione superficiale all'interno dell'area di interesse. Infatti, la presenza di bersagli radar che registrano elevati valori di velocità media di deformazione all'interno dei periodi coperti dalle acquisizioni, costituisce un'indicazione chiara della possibile presenza di fenomeni deformativi nelle aree (Fig. 56).

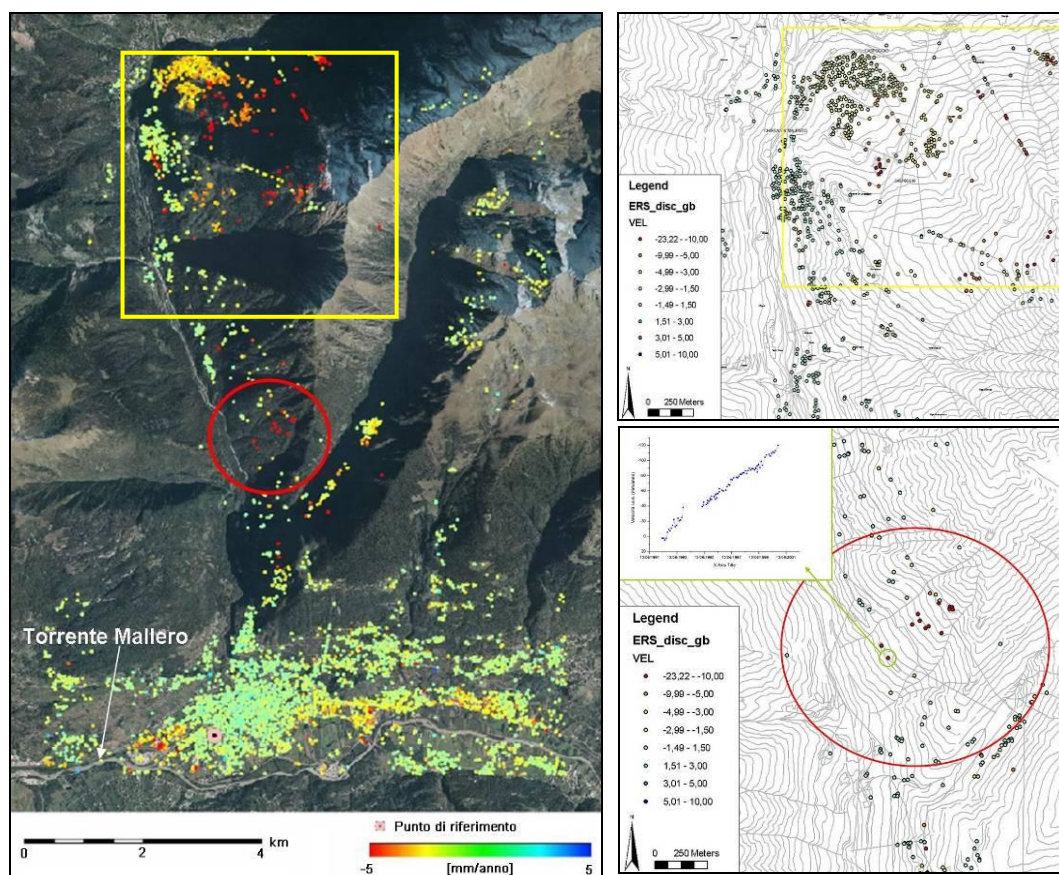


Fig. 56 - Analisi PS ERS1/2 eseguita nell'area di Spriana (SO). In rosso è indicata l'area all'interno di cui è identificabile la frana oggetto d'indagine, in giallo è invece evidenziata un'altra area in movimento individuata grazie all'analisi (Casagli, 2008).

In funzione della tipologia di fenomeni che devono essere identificati, le velocità di deformazione che vengono considerate rilevanti sono piuttosto differenti. Ad esempio, se lo scopo del lavoro è quello di aggiornare una mappa inventario dei fenomeni franosi a fini di pianificazione territoriale anche movimenti estremamente lenti possono risultare di estremo interesse. In generale, i bersagli caratterizzati da velocità medie di deformazione che superano i $\pm 1,5$ -2 mm/anno sono quelli che vengono considerati instabili. Tali valori tuttavia dipendono strettamente dalle caratteristiche delle immagini di partenza utilizzate per implementare l'analisi interferometrica, dalla sensibilità della tecnica utilizzata per elaborare le immagini e dalle caratteristiche evolutive del fenomeno di interesse (cfr. 4.1).

La presenza di evidenti contrasti di velocità media di deformazione tra le diverse zone dell'area esaminata permette di identificare la presenza di aree in movimento e di discriminare diversi comportamenti deformativi all'interno della stessa scena.

- Per facilitare l'individuazione delle aree instabili può essere utile estendere spazialmente l'informazione sulle deformazioni registrate in corrispondenza dei singoli bersagli radar a tutta l'area di interesse, facendo uso degli algoritmi di interpolazione proposti nella sezione 4.3.1.
- La perimetrazione dei fenomeni di dissesto può essere agevolata sovrapponendo i risultati dell'analisi satellitare su una carta geomorfologica, in modo da definire con esattezza l'area instabile, mappando l'area interessata dalle deformazioni, e identificando le aree soggette a diverse velocità e *trend* di spostamento annuale.

Particolarmente in aree dove la copertura vegetale o il tessuto urbano non permettono il riconoscimento di caratteristiche morfologiche legate ai dissesti, i maggiori benefici provenienti dall'integrazione delle misure di deformazione fornite dalle analisi interferometriche con i rilievi convenzionali, sono legati alla migliore definizione dei limiti di corpi di frana già identificati e all'identificazione di aree instabili non mappate in precedenza.

Nel caso in cui i bersagli radar ricadano in zone già individuate all'interno di mappe inventario preesistenti, oppure vicine ad esse, le misure di deformazione ottenute per mezzo dell'analisi radar satellitare possono essere utili per confermare o modificare il perimetro di frane preesistenti e individuare eventuali nuovi movimenti di versante non ancora mappati.

Generalmente, per rendere più solida l'interpretazione dei dati radar nella ricerca di eventuali fenomeni franosi, è consigliabile focalizzare l'attenzione su gruppi di almeno 3-4 punti di misura radar (Fig. 57). Infatti, la misura di deformazione registrata su un singolo bersaglio, può spesso non essere rappresentativa e indicativa della presenza di un fenomeno di dissesto, ma essere legata ad un problema di instabilità locale, quale la deformazione di una singola struttura (es. edificio lesionato).

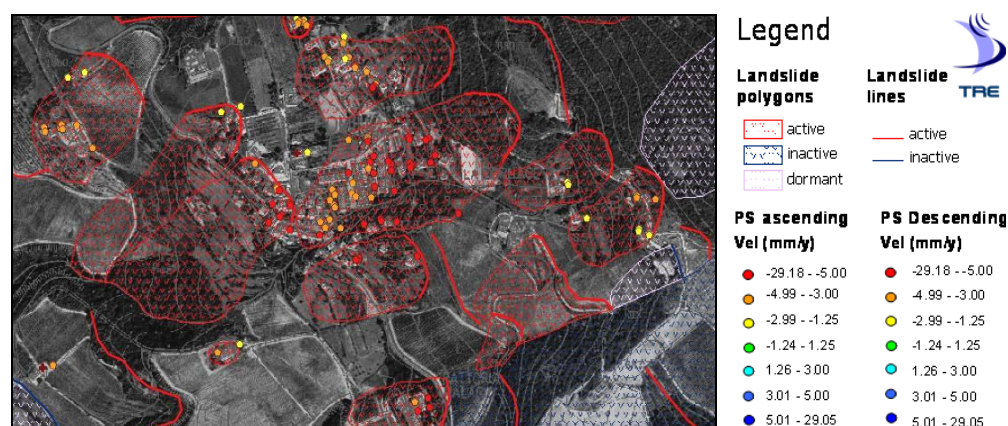


Fig. 57 - Esempio di perimetrazione dei fenomeni franosi effettuata mediante l'uso integrato della fotointerpretazione e dell'analisi delle informazioni di velocità di deformazione ricavate dall'analisi PS di dati ERS ascendenti e discendenti e relativi all'intervallo 1992-2000 (Farina et al., 2003).

Una volta individuate le indicazioni sulla consistenza dei movimenti misurati da satellite con la presenza di un fenomeno di dissesto, è necessario cercare di interpretare la geometria del movimento. Dal punto di vista operativo, si procede secondo le seguenti fasi:

- Integrazione delle informazioni ricavate dalle curve di livello e della mappa di esposizione dei versanti con le deformazioni misurate mediante l'elaborazione interferometrica per definire la probabile direzione di movimento nel piano orizzontale.
- Se sono disponibili analisi interferometriche eseguite su immagini acquisite lungo le due diverse geometrie, ascendente e discendente, si può effettuare la loro combinazione per risalire alle componenti del vettore di deformazione nella direzione verticale e orizzontale E-W (cfr. 4.3.3).

Se le analisi effettuate non permettono di ottenere alcuna informazione aggiuntiva rispetto alle misure interferometriche satellitari, è necessario effettuare rilievi di campagna per evidenziare eventuali lesioni su edifici, presenza di contropendenze nel terreno, venute di acqua e altre evidenze geomorfologiche di fenomeni di instabilità.

5.1.1.2 Valutazione dello stato di attività e intensità dei fenomeni

Nell'ambito delle analisi volte all'individuazione e mappatura di frane, una volta individuata la distribuzione spaziale dei diversi fenomeni sull'area di interesse, eventualmente modificata sulla base delle informazioni provenienti dall'interpretazione dei dati ancillari e dei dati radar satellitari, si valutano per ciascun fenomeno lo stato di attività e l'intensità. A tale scopo, UNIFI-DST negli ultimi anni ha sviluppato una procedura per stimare lo stato di attività dei fenomeni franosi e per valutare la loro intensità a partire dalle misure radar satellitari ottenute attraverso elaborazioni multi-interferogramma. Tale metodologia è stata implementata e sviluppata allo scopo di aggiornare le mappe inventario in diversi *test site*, nell'ambito di progetti nazionali ed internazionali quali SLAM, TerraFirma, PREVIEW e SAFER.

La valutazione dello stato di attività dei fenomeni, nel caso in cui siano disponibili sia analisi interferometriche su dati ERS1/2 che su dati ENVISAT e, in accordo con la classificazione dello stato di attività proposta all'interno del Dizionario Internazionale delle frane (WP/WLI, 1993), può essere effettuata utilizzando una matrice come quella riportata in Fig. 58.

Le classi di stato di attività in uscita da tale matrice sono determinate sulla base dell'analisi dei risultati della radar-interpretazione delle elaborazioni interferometriche eseguite sia su dati storici (ERS1/2, 1992-2001) sia su dati aggiornati (ENVISAT, 2003-oggi) e, in particolare, vengono definite introducendo la seguente soglia:

- 2 mm/anno: velocità media di deformazione che discrimina lo stato di presenza da quello di assenza di movimento.

Tramite l'uso della matrice di attività proposta nella Fig. 58, è possibile quindi distinguere le seguenti 4 classi di attività:

- FENOMENO ATTIVO

- Continuo: la velocità di deformazione caratteristica del fenomeno supera la soglia sia nell'analisi dei dati storici che all'interno dei dati aggiornati.
- Riattivato: la velocità di deformazione caratteristica del fenomeno è minore della soglia all'interno dei dati storici e maggiore di essa all'interno dei dati aggiornati.

- FENOMENO INATTIVO

- Stabilizzato: la velocità di deformazione caratteristica del fenomeno è minore della soglia sia nell'analisi dei dati storici che all'interno dei dati aggiornati.
 - Quiescente: la velocità di deformazione caratteristica del fenomeno supera la soglia all'interno dei dati storici ma è minore di essa all'interno dei dati aggiornati.
-

		ERS1/2 (1992-2001)	
		< 2 mm/anno	> 2 mm/anno
ENVISAT (2003-oggi)	< 2 mm/anno	STABILIZZATO	QUIESCENTE
	> 2 mm/anno	ATTIVO (riattivato)	ATTIVO (continuo)

Fig. 58 - Esempio di matrice per valutare lo stato di attività di fenomeni franosi a partire da dati radar satellitari acquisiti dai satelliti ERS1/2 ed ENVISAT ed elaborati con tecniche multi-interferogramma. I nomi delle classi di attività si riferiscono alle definizioni del WP/WLI (1993).

Per le frane attive, può essere integrata l'informazione qualitativa sullo stato di attività con l'informazione quantitativa relativa al valore della velocità caratteristica del fenomeno analizzato, si può integrare la matrice di attività (Fig. 58) con la classificazione dell'intensità proposta da Cruden & Varnes (1996), mediante una scala di intensità come quella riportata in Fig. 59.

Le classi di intensità a cui si fa riferimento in questo ambito sono quelle dei fenomeni molto lenti (velocità minore di 16 mm/anno) ed estremamente lenti (velocità tra 16 mm/anno e 1,6 m/anno) poiché, come discusso nella sezione 3.2 (Tabella 5), soltanto tali categorie di fenomeni risultano monitorabili mediante l'interferometria radar satellitare. Inoltre, considerando le caratteristiche dei risultati delle analisi multi-interferogramma e, in particolare, la loro sottostima del reale valore della velocità di deformazione (cfr. 4.4.1), le soglie di velocità che discriminano tali classi di intensità sono assunte pari a:

- 2 mm/anno: velocità media di deformazione limite inferiore della classe dei fenomeni estremamente lenti;
- 10 mm/anno: velocità media di deformazione che discrimina la classe dei fenomeni molto lenti da quelli estremamente lenti.

ENVISAT (2003-oggi)		
< 2 mm/anno	2 - 10 mm/anno	> 10 mm/anno
-	ESTREMAMENTE LENTO	MOLTO LENTO

Fig. 59 - Esempio di scala per valutare l'intensità dei fenomeni franosi (in termini di velocità) a partire da dati radar satellitari acquisiti dal satellite ENVISAT (2003-oggi) ed elaborati con tecniche multi-interferogramma. I nomi delle classi di intensità fanno riferimento alla classificazione di Cruden & Varnes (1996). La classificazione dell'intensità ha significato soltanto per i fenomeni che presentano segni di attività e non per frane inattive (stabilizzate o quiescenti).

I valori delle soglie di velocità indicate all'interno della matrice e della scala contenute in Fig. 58 e in Fig. 59 rispettivamente, sono stati determinati in base alle esperienze maturate nel tempo dal DST e si riferiscono a specifiche analisi e non possono dunque essere considerate

assolute. Infatti, nell'ambito di ogni applicazione, il loro valore deve essere determinato tenendo conto dei seguenti fattori:

- precisione della tecnica multi-interferogramma utilizzata;
- caratteristiche del *dataset* di immagini (posizione del *reference point*);
- caratteristiche morfologiche dell'area analizzata (pendenza, esposizione);
- sensibilità della LOS rispetto alla direzione di movimento dei fenomeni in esame (cfr. 4.4.1).

Dal punto di vista operativo, l'implementazione della metodologia ha inizio successivamente all'individuazione della distribuzione spaziale e dei limiti dei fenomeni franosi sull'area di interesse. Per ciascun'area mappata, vengono valutati:

- il numero di bersagli radar che ricadono all'interno dei suoi limiti;
- i valori minimi, massimi e medi di deformazione misurati in corrispondenza dei bersagli.

Si procede quindi, per ciascun fenomeno franoso, con l'analisi della distribuzione spaziale dei bersagli radar al suo interno e con lo studio della distribuzione di frequenza dei valori di velocità di deformazione misurati sui bersagli. Lo scopo di queste due analisi consiste nella determinazione di un valore di velocità di spostamento che possa essere rappresentativa del fenomeno in analisi. Generalmente, il valore di velocità che viene attribuito a ciascun fenomeno coincide con il valore medio delle misure registrate sui bersagli che ricadono al suo interno o, in modo più cautelativo, con il valore massimo misurato.

Una volta determinato il valore di deformazione caratteristico del fenomeno, si procede con la valutazione del suo stato di attività e della sua intensità mediante l'uso delle matrici riportate in Fig. 58 e in Fig. 59. Chiaramente, nessuna deduzione può considerarsi conclusiva finché non vengono effettuati gli opportuni controlli *in situ*.

Le valutazioni sullo stato di attività e sull'intensità dei fenomeni, dedotte tramite questa tipologia di analisi, si riferiscono sempre alla data di aggiornamento dei dati satellitari utilizzati in fase di interpretazione. Per tale ragione, se nell'ambito delle applicazioni si verifica la disponibilità soltanto di elaborazioni interferometriche satellitari relative all'archivio storico (1992-2001) o ad un archivio di immagini più recenti ma non aggiornato (es. 2003-2006), la stima dello stato di attività e dell'intensità potrà essere espressa esclusivamente in riferimento alla data di acquisizione della più recente immagine utilizzata.

5.1.1.3 Aggiornamento di mappe inventario

Le mappe inventario delle frane riportano la distribuzione spaziale dei dissesti avvenuti in passato e ancora identificabili al momento della realizzazione dell'inventario stesso, includendo inoltre informazioni circa la tipologia e lo stato di attività di ciascun fenomeno (Wieczorek, 1984).

Ad oggi non esiste né a livello internazionale né a livello nazionale italiano una metodologia standardizzata per la realizzazione delle mappe inventario dei fenomeni franosi. Tali mappe sono realizzate a differenti scale e con differenti livelli di dettaglio a seconda dello scopo per cui vengono prodotte. Le metodologie più comunemente utilizzate per la produzione delle mappe inventario sono basate sull'impiego di archivi storici, *database* locali e fotointerpretazione di riprese aree stereoscopiche, nonché sull'esecuzione di rilievi geomorfologici di campagna (Crozier, 1984; Soeters & Van Westen, 1996). Le mappe inventario realizzate con tali tecniche sono normalmente soggette a incertezze e limiti legati prevalentemente alla difficoltà oggettiva nel riconoscimento ed alla conseguente mappatura delle forme connesse ai movimenti gravitativi, soprattutto in presenza di fitta copertura vegetale, rimodellazione antropica dei versanti o frane antiche (Brardinoni et al., 2003). Ancor più problematica è la valutazione dello stato di attività delle frane, per la determinazione del quale nel corso degli anni sono stati proposti vari approcci, come l'analisi stereoscopica multi-temporale di foto aeree (Canuti & Focardi, 1986). In ogni caso, anche mediante l'utilizzo di quest'ultimo tipo di analisi, la determinazione dello stato di attività di frane caratterizzate da una fitta copertura vegetale o antropica e da morfologie non chiaramente correlabili a fenomeni franosi, è problematica.

L'utilizzo dell'interferometria SAR da piattaforma satellitare, fornendo su vaste aree misure di spostamento del terreno con un'elevata precisione, può offrire un ottimo supporto nella realizzazione delle mappe inventario delle frane. In particolare, la disponibilità di immagini SAR acquisite dal 1992 con continuità e a cadenza mensile (cfr. 2.2) ed il recente sviluppo delle tecniche di elaborazione multi-interferogramma (cfr. 2.4), permettono di superare molti dei limiti dell'interferometria differenziale classica ed aprono nuove prospettive per la mappatura dei fenomeni franosi a scala regionale.

I contributi che l'analisi interferometrica satellitare può apportare nei confronti del censimento dei fenomeni franosi o all'aggiornamento di una mappa inventario a scala regionale sono dunque:

- verifica o eventuale modifica della **perimetrazione** dei fenomeni;
- **individuazione** di eventuali fenomeni non emersi dalle analisi geomorfologiche e dalle informazioni bibliografiche e gli studi eseguiti sulla zona;
- definizione dello **stato di attività** e intensità (in termini di velocità) dei fenomeni;
- ricostruzione della **componente verticale** e **orizzontale E-W** della deformazione, sfruttando la combinazione di dati rilevati lungo due geometrie di acquisizione.

Sulla base dei risultati dell'analisi volta all'individuazione dei fenomeni di dissesto (cfr. 5.1.1.1) e alla valutazione del loro stato di attività e della loro intensità (cfr. 5.1.1.2), si procede con l'aggiornamento della mappa inventario.

Dal punto di vista operativo, i possibili casi che si verificano nella fase interpretativa e le conseguenti soluzioni da adottare possono essere schematizzati come segue (Fig. 60):

- Punti di misura radar presenti all'interno di aree già mappate in frana:

- Accordo tra stato di attività e velocità media dei bersagli radar: lo stato di attività del fenomeno è confermato.
- Disaccordo tra stato di attività e la velocità media dei punti di misura radar: lo stato di attività della frana può essere modificato, analizzando le velocità medie di deformazione assunte dai bersagli radar sia nei dati storici sia in quelli aggiornati. Tale valutazione deve essere supportata dall'interpretazione delle immagini ottiche e in particolare dal confronto tra acquisizioni multi-temporali.

- Punti di misura radar presenti all'esterno di aree già mappate in frana:

- Punti di misura in movimento:
 - *Presenza di evidenze morfologiche e vegetazionali connesse con la presenza di frana*: inserimento di una nuova area in frana all'interno dell'inventario e/o modifica dei limiti della frana pre-mappata per comprendere l'area interessata dai punti in movimento. Tale valutazione deve essere supportata dall'interpretazione delle immagini ottiche e dall'analisi della morfologia, desunta dalle curve di livello, al fine di evidenziare la presenza di elementi che possano suggerire l'eventuale appartenenza a un corpo di frana. L'accordo/disaccordo delle misure radar con lo stato di attività del fenomeno deve essere verificato ed eventualmente si deve procedere con la modifica dello stesso.
 - *Assenza di evidenze morfologiche e vegetazionali connesse con la presenza di frana*: inserimento di un elemento instabile (scarpata, corona, ecc.).
- Punti di misura stabili: nessun intervento.

Le informazioni dedotte dalle fasi precedenti devono necessariamente essere seguite da controlli di campagna, per verificare, confermare o eventualmente migliorare, le perimetrazioni dei fenomeni e le valutazioni sul loro stato di attività dedotte mediante l'analisi integrata della fotointerpretazione delle acquisizioni ottiche e la radar-interpretazione dei dati SAR satellitari.

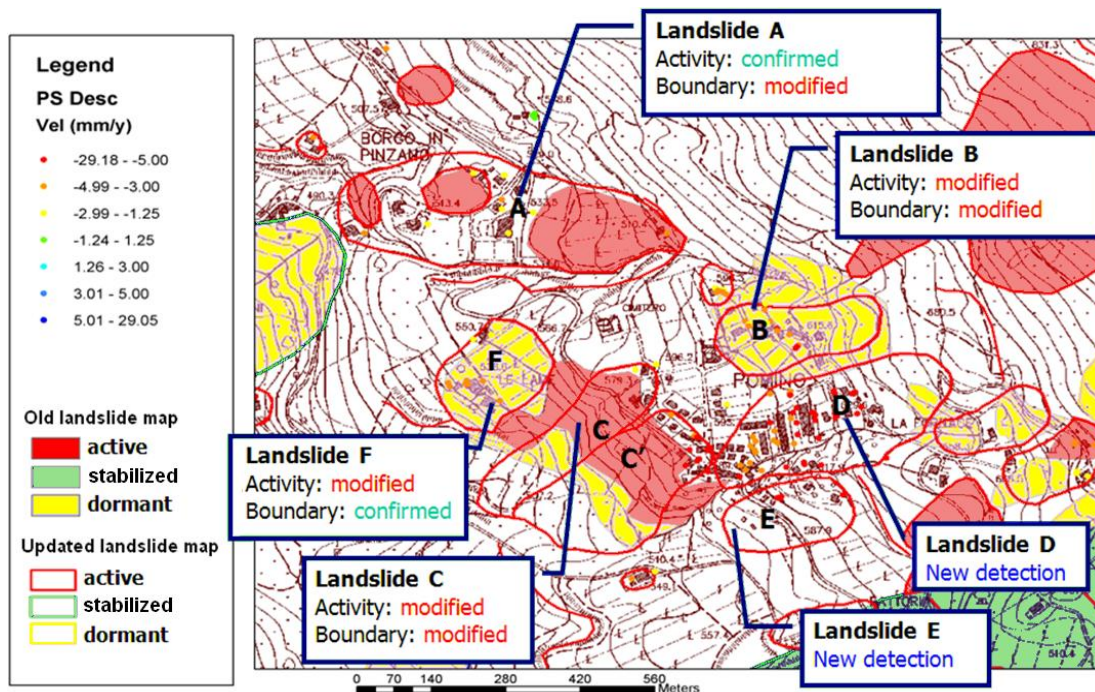


Fig. 60 - Esempio di aggiornamento di una mappa inventario dei fenomeni franosi mediante l'uso di tecniche PSI. È segnalata l'eventuale modifica o conferma del perimetro e/o stato di attività di frane pre-mappate o l'individuazione di nuovi fenomeni (modificata da Canuti et al., 2005a).

5.1.2 Area test: Calabria Centrale

Al fine di supportare l'aggiornamento della mappa inventario dei fenomeni franosi nell'area della Calabria Centrale, è stata eseguita un'analisi interferometrica satellitare a scala regionale, secondo l'approccio di individuazione e inventario presentato all'interno della sezione 5.1.1 e schematizzato nella Fig. 54.

L'area investigata include parte delle province di Cosenza, Catanzaro, Crotone e Vibo Valentia (area totale di 4,470 km²; Fig. 61), comprendente settori interessati da imponenti fenomeni franosi che in anni recenti hanno spesso assunto carattere catastrofico.

In queste aree affiorano principalmente complessi alloctoni di rocce cristalline e metamorfiche, associate a sequenze sedimentarie Eoceniche e, lungo la porzione interna dell'arco Calabrian, rocce carbonatiche del Mesozoico (Van Dijk et al. 2000). Depositi Pliocenici e Pleistocenici affiorano principalmente nell'area orientale e costiera che affaccia sullo Ionio e, parzialmente, nella porzione occidentale.

L'assetto geomorfologico dell'area è caratterizzato da movimenti di versante distribuiti e, in particolare, si riconoscono diversi scivolamenti rotazionali, colate lente, movimenti complessi e, secondariamente, erosione intensa e frane superficiali rapide. Gli scivolamenti di terra coinvolgono generalmente le rocce metamorfiche, mentre le colate di terra i depositi Pliocenici. Tali frane generalmente mostrano morfologie recenti (nuove attivazioni). Inoltre, la parte orientale della catena costiera è interessata da diversi fenomeni gravitativi a larga scala e profondi (Iovine et al. 2006).

La mappa inventario delle frane ufficiale relativa a quest'area, è parte del PAI della Regione Calabria, pubblicato nel 2006 e distribuito dall'Autorità di Bacino. Essa comprende un totale di 4.102 fenomeni, dei quali 861 (21%) sono classificati come attivi, 3.220 (78%) come quiescenti e 21 (1%) come inattivi (Fig. 61), complessivamente ricoprenti un'area di 325 km², corrispondente a circa il 7% dell'area investigata.

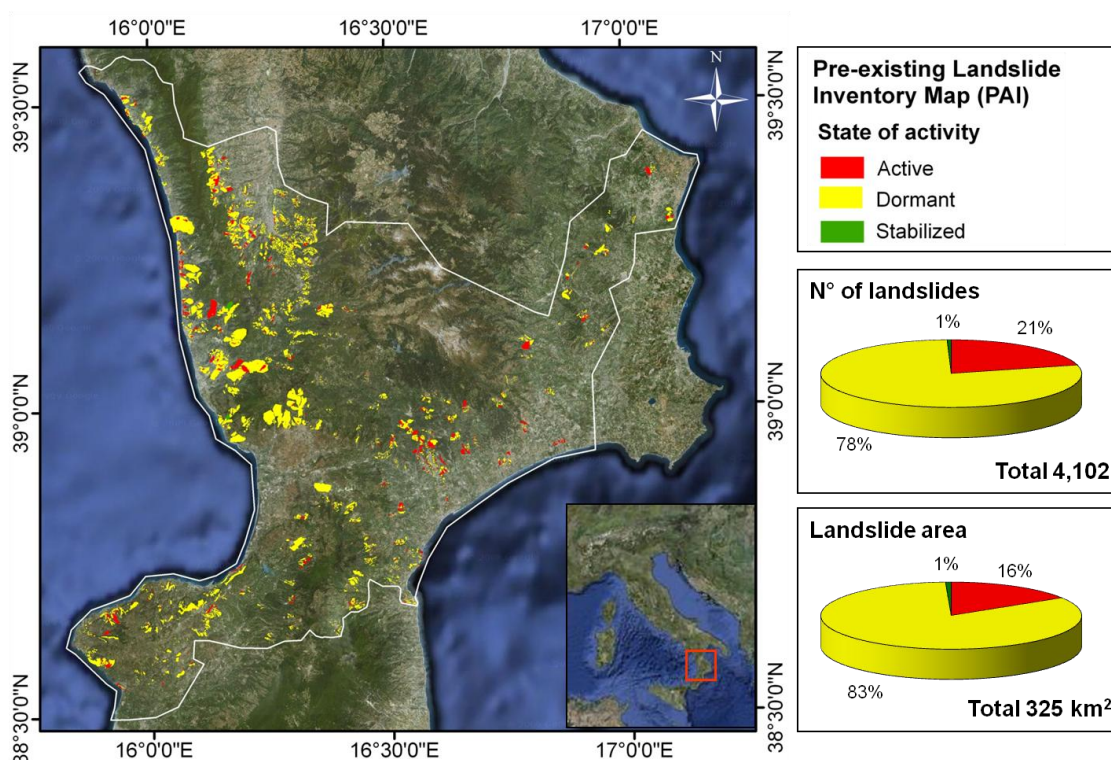


Fig. 61 - Mappa inventario della Calabria Centrale (PAI 2006) e distribuzione statistica dei fenomeni franosi in base allo stato di attività (Cigna et al., 2010a; cfr. allegato).

Mediante la metodologia di radar-interpretazione per l'individuazione e inventario dei dissesti, sono stati integrati i dati ancillari tematici (topografia, geologia, geomorfologia, uso del suolo, ecc.) disponibili per l'area di interesse con i dati ottici satellitari e aerei (fotointerpretati con approccio monoscopio) e con le misure PSI ENVISAT 2003-2009. In generale, il contributo fornito da tale tipologia di analisi è consistito in differenti aspetti: i) identificazione e mappatura di fenomeni di dissesto non precedentemente mappati mediante analisi geomorfologiche convenzionali; ii) verifica o modificazione delle perimetrazioni esistenti; iii) valutazione delle velocità di deformazione rappresentative per ciascun fenomeno; iv) definizione o aggiornamento dello stato di attività e intensità; v) valutazione delle principali direzioni di movimento, attraverso la combinazione di misure PSI ascendenti e discendenti (se disponibili).

In dettaglio, i dati tematici analizzati sono elencati di seguito:

- Mappa topografica 1:25.000 dell'IGM e 1:10.000 del Centro Cartografico Regionale;
- DTM a risoluzione 20 m;
- Carta geologica regionale 1:25.000 del Centro Cartografico Regionale;
- Ortofoto digitali a colori del Volo Italia 2000, 1 m di risoluzione;
- Immagine SPOT multispettrale del 2005, 2,5 m di risoluzione;
- CORINE Land Cover map 1:50.000 (3° livello) del 2000, dell'ISPRA.

I dati satellitari analizzati, comprendono 108 acquisizioni ENVISAT ASAR ascendenti del periodo 2003-2009, distribuite uniformemente su 3 *frame* distinti. Tali immagini sono state elaborate da e-GEOS mediante la tecnica PSP-DIFSAR che ha permesso di ricavare oltre 340.00 PS nell'intera area investigata, con una distribuzione media di circa 78 PS/km².

Per valutare lo stato di attività e l'intensità (in termini di velocità) dei dissesti sono state usate la matrice e la scala riportate in Fig. 62, basate sulla combinazione delle informazioni provenienti dall'inventario preesistente (PAI del 2006) e dalle misure PSI 2003-2009.

Activity Matrix		ENVISAT data (2003-2009)	
Pre-existing Landslide Inventory (PAI 2006)		$V < 2 \text{ mm/yr}$	$V \geq 2 \text{ mm/yr}$
	Stabilized	Stabilized	Reactivated
	Dormant	Dormant	Reactivated
	Active	Active	Active
New Landslide		Dormant	Active

Intensity Scale			ENVISAT data (2003-2009)		
			$V < 2 \text{ mm/yr}$	$V = 2-10 \text{ mm/yr}$	$V > 10 \text{ mm/yr}$
			Negligible	Extremely slow	Very slow

Fig. 62 - Matrice di attività e scala di intensità basate sulla combinazione delle informazioni dell'inventario preesistente e misure PSI ENVISAT 2003-2009 (Cigna et al., 2010a; cfr. allegato).

I valori di deformazione annuale caratteristici di ciascun fenomeno di dissesto, misurati nel 2003-2009, sono stati determinati mediante l'analisi della distribuzione spaziale e frequenza dei dati PSI all'interno dei limiti di ciascun fenomeno. Tali valori sono stati poi confrontati con le soglie di deformazione di 2 e 10 mm/anno (misurate lungo la LOS) e combinati con le informazioni provenienti dal PAI per determinare stato di attività (*reactivated*, *active*, *dormant*, *stabilized*) e intensità (*negligible*, *extremely slow*, *very slow*; Fig. 62 e Fig. 63). Le suddette soglie sono valori sito-specifici e sono stati empiricamente determinati considerando le caratteristiche dell'analisi, sia in termini di tipologia di fenomeni analizzati, sia in termini di caratteristiche tecniche delle misure di deformazione (es. direzione della LOS, accuratezza delle misure, distanza dal *reference point*, ecc.). In generale, la matrice di attività è stata usata adottando un approccio 'conservativo', ovvero non riducendo mai la classe dello stato di attività di fenomeni quiescenti o attivi (a stabilizzati o quiescenti, rispettivamente), anche nei casi in cui le misure PSI riportavano movimenti trascurabili (minori di 2 mm/anno), a meno che le evidenze di campagna e le misure *in situ* non consentano (in futuro) di confermare una reale riduzione dell'attività del fenomeno analizzato (Fig. 62).

La mappa inventario della Calabria Centrale aggiornata mediante l'approccio di radar-interpretazione dei dati PSI 2003-2009 sopra descritto, è riportata nella Fig. 64.

La metodologia ha consentito di ricavare informazioni di carattere qualitativo e/o quantitativo per 980 frane dell'inventario preesistente (23,9%), aggiornando la perimetrazione e/o lo stato di attività di 144 fenomeni e confermando invece le informazioni dei restanti 836 fenomeni. L'analisi ha inoltre consentito di mappare 64 nuove frane, corrispondenti al 1,5% dell'inventario aggiornato. Quest'ultimo include complessivamente 4.166 fenomeni, per un'area totale di 334 km² (Fig. 63 e Tabella 10).

L'analisi della distribuzione dello stato di attività e intensità dei fenomeni mappati nell'inventario aggiornato mostra che 229 e 93 dissesti erano nel 2009 attivi e riattivati

rispettivamente, per un totale – nell'intera area analizzata (Fig. 63) – di 919 fenomeni attivi (continui; 60.3 km²; 18%), 93 riattivati (22.6 km²; 7%), 3.136 quiescenti (248.7 km²; 74%) e 18 stabilizzati (2.2 km²; 1%).

La presenza di aree intensamente vegetate ha condotto frequentemente al verificarsi di insufficienti densità di bersagli radar (NC) sui fenomeni di interesse o anche alla loro totale assenza (NO_INFO), causata dalla significativa decorrelazione temporale provocata dalla variabilità della riflettività di tali coperture (Tabella 10). Questa problematica ha riguardato il 7,8% (fenomeni NC) e il 68,3% (fenomeni NO_INFO) dell'inventario preesistente. In tali casi, le informazioni spaziali e temporali dei dissesti non sono state modificate.

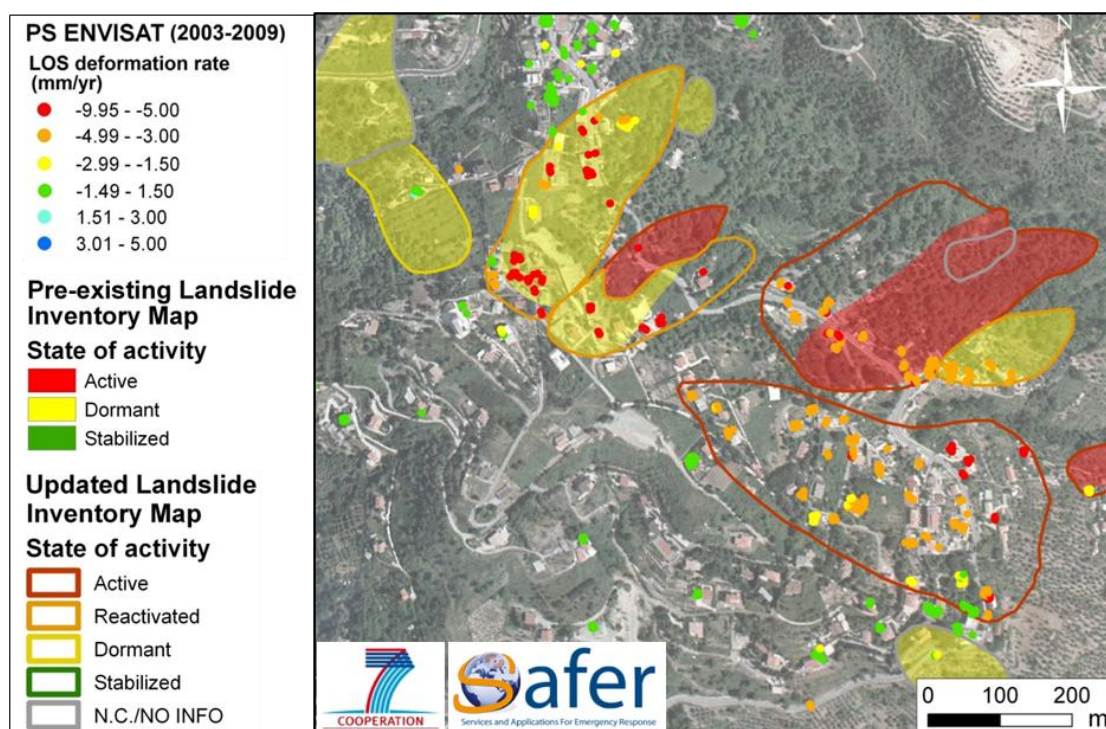


Fig. 63 - Esempio di aggiornamento della mappa inventario della Calabria Centrale (Cigna et al., 2010a; cfr. allegato).

Frane	N°	Inventario preesistente (2006)	Inventario aggiornato (2009)
Aggiorate	980	23,9%	23,5%
Nuove	64	-	1,5%
NC e NO_INFO	3.122	76,1%	74,9%
Totale		4.102 frane 100%	4.166 frane 100%

Tabella 10 - Distribuzione dei fenomeni franosi nell'inventario preesistente (2006) e aggiornato (2009). NC e NO_INFO, indicano fenomeni per i quali è stato riscontrato, rispettivamente, un numero insufficiente o una totale assenza di punti di misura all'interno dei rispettivi limiti areali (modificata da Cigna et al., 2010a; cfr. allegato).

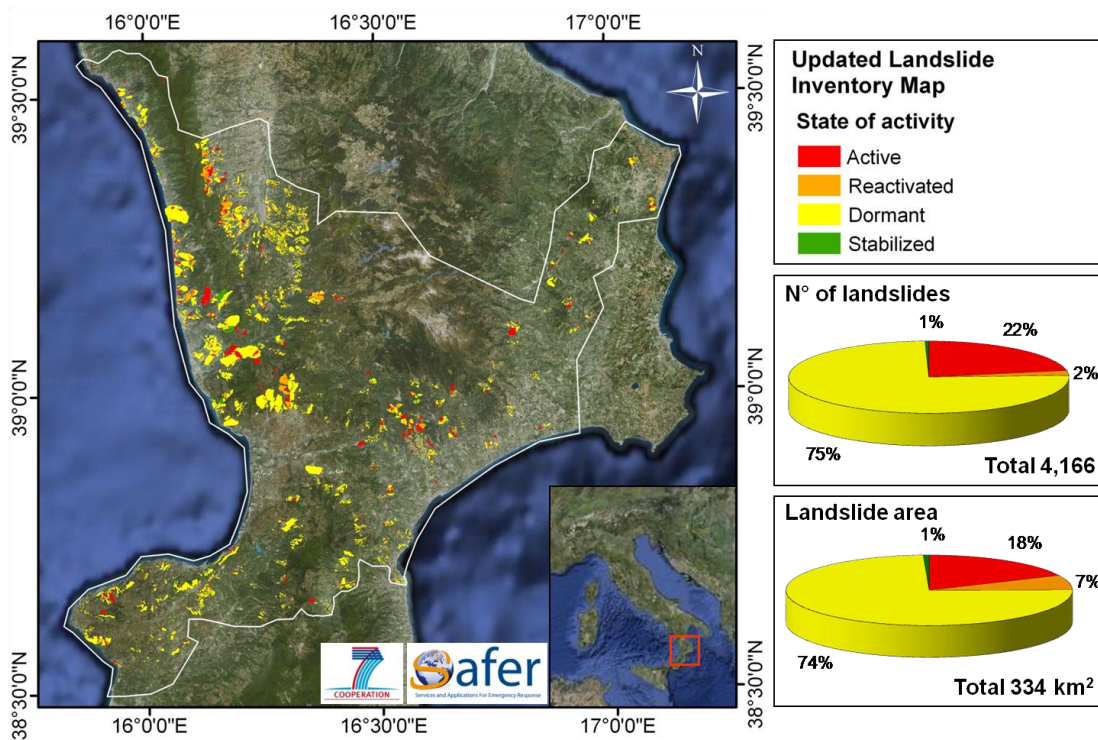


Fig. 64 - Mappa inventario della Calabria Centrale aggiornata mediante l'approccio di radar-interpretazione. Distribuzione statistica dei fenomeni franosi in base allo stato di attività (Cigna et al., 2010a; cfr. allegato).

Per maggiori approfondimenti riguardanti l'analisi di individuazione e inventario eseguita per l'area della Calabria Centrale si consulti il seguente lavoro scientifico allegato alla presente Tesi di Dottorato:

- **CIGNA F., BIANCHINI S., RIGHINI G., PROIETTI C., CASAGLI N. (2010a)** - *Updating landslide inventory maps in mountain areas by means of Persistent Scatterers Interferometry (PSI) and photo-interpretation: Central Calabria (Italy) case study*. In: Malet, J.-P., Glade, T., Casagli, N. (eds.), *Mountain Risks: Bringing Science to Society* (572 pp.). Proc. of the International Conference, 24-26th November 2010, Florence, Italy. CERG Editions, Strasbourg, France, pp. 3-9.

5.2 Caratterizzazione temporale e spaziale dei fenomeni di dissesto

La caratterizzazione temporale e spaziale dei dissesti consiste in tutte le attività finalizzate all'aggiornamento ed all'integrazione del quadro conoscitivo sul rischio geologico, sia in fase di pre-evento e post-evento per la pianificazione e prevenzione del rischio, sia in fase di emergenza per la sua gestione e mitigazione. Tali attività comprendono la determinazione della tipologia, delle cause e delle caratteristiche spaziali e temporali dei fenomeni e sono finalizzate ad una più efficiente gestione dell'emergenza connessa con il rischio geologico. Infatti, attraverso una corretta definizione del fenomeno, della sua estensione e del tipo di cinematisimo che lo contraddistingue, è possibile sviluppare le strategie più idonee per la mitigazione del rischio da esso provocato.

Le tecniche multi-interferogramma forniscono un contributo essenziale per la caratterizzazione dei dissesti, soprattutto in quei casi in cui prima dell'attivazione della fase di emergenza legata ai fenomeni, la loro presenza non è nota a priori o la loro manifestazione non è anticipata da segni precursori riconoscibili dalla strumentazione convenzionale. In questi casi infatti, nel periodo che precede l'evento catastrofico, generalmente il fenomeno non è tenuto sotto controllo ed è dunque impossibile ottenere informazioni sulle condizioni di stabilità dell'area prima del verificarsi dell'evento che ha generato l'emergenza.

I prodotti finali dell'attività di caratterizzazione temporale e spaziale consistono in mappe dei dissesti e rapporti di caratterizzazione e valutazione, ottenuti grazie all'analisi integrata di dati satellitari, dati ancillari di superficie e/o di sottosuolo ed eventuali dati ricavati da indagini di terreno e/o di laboratorio. Tali attività sono di competenza sia del tempo differito sia di quello reale (così come definiti dalla Dir. P.C.M. del 27/02/2004). Le differenze che si riscontrano tra le due diverse tipologie di applicazione riguardano le diverse tempistiche in cui le analisi sono svolte e il conseguente grado di approfondimento delle analisi.

In generale, la caratterizzazione temporale e spaziale dei dissesti si basa su analisi più di dettaglio rispetto alle attività di identificazione e inventario dei fenomeni. Per quanto riguarda le analisi dei dati radar satellitari, infatti, oltre all'interpretazione delle misure di velocità media di deformazione registrate sull'area di interesse, è eseguita l'analisi approfondita delle serie storiche di deformazione dei bersagli radar, in modo da metter in luce, oltre ai *trend* deformativi medi registrati nel periodo coperto dalle acquisizioni, anche eventuali accelerazioni o variazioni del tasso di deformazione e formulare una valutazione sulla tipologia, sulle cause e sull'estensione che caratterizza il fenomeno in esame.

5.2.1 Metodologia

La metodologia descritta di seguito per la caratterizzazione temporale e spaziale dei dissesti è basata sull'utilizzo integrato di dati cartografici tradizionali e immagini telerilevate, acquisite sia da sensori ottici e analizzate mediante la fotointerpretazione, sia da sensori radar ed elaborate con analisi multi-interferogramma. Tale approccio, schematizzato all'interno della Fig. 65 è composto dalle seguenti fasi:

- *Back monitoring* dell'evoluzione temporale di un fenomeno
- Interpretazione avanzata di serie temporali PSI
- Ricostruzione della geometria di un fenomeno
- Confronto e integrazione con dati ancillari e *in situ*

Ciascuna delle suddette fasi sarà descritta e discussa all'interno delle sezioni seguenti.

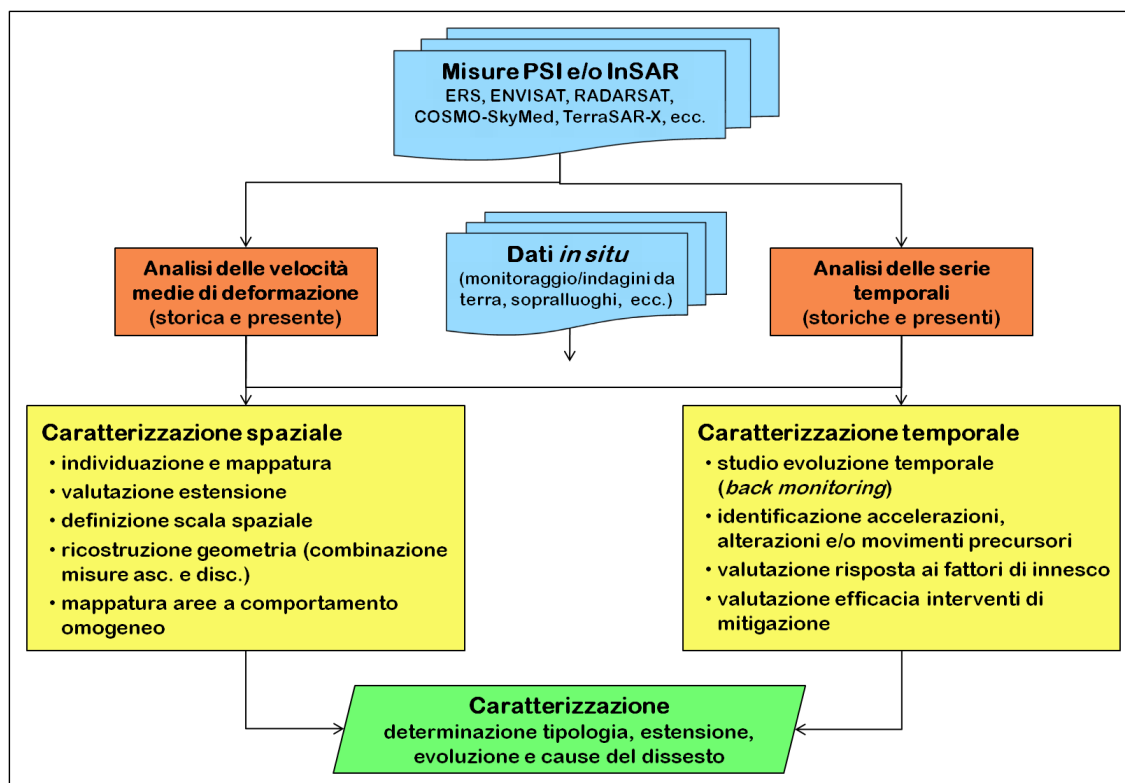


Fig. 65 - Principio di funzionamento della metodologia di radar-interpretazione per la caratterizzazione temporale e spaziale dei dissesti.

La caratterizzazione temporale consiste nella ricostruzione della storia deformativa dei fenomeni di interesse attraverso il monitoraggio delle deformazioni verificatesi nel passato (concetto del *'back monitoring'*; Cigna et al., under review; cfr. allegato).

In generale, l'attività di monitoraggio comprende il controllo nel tempo dell'evoluzione del fenomeno con particolare riguardo ai precursori e agli indicatori del manifestarsi di prefigurati scenari d'evento, nonché all'analisi dei conseguenti effetti qualora non venga realizzata nessuna azione di contenimento o contrasto (Fig. 65).

I più comuni parametri monitorati sono rappresentati a vasta scala dalle precipitazioni, mentre a scala di versante dalle deformazioni e dalle pressioni neutre dei singoli fenomeni. La misura degli spostamenti superficiali del terreno indotti dalla presenza di dissesti idrogeologici spesso rappresenta il metodo più efficace per capire il comportamento del fenomeno in atto, permettendo di osservare la risposta del movimento ai fattori innescanti e l'efficacia di eventuali interventi di mitigazione. Di conseguenza questo tipo di informazione può risultare utile per definire i possibili scenari evolutivi del fenomeno, specialmente per i fenomeni che insistono su elementi a rischio di elevato valore, come nel caso di dissesti che coinvolgono aree antropizzate.

Per il monitoraggio dell'evoluzione nel tempo degli spostamenti superficiali del terreno esistono varie tecniche e strumenti, dai tradizionali estensimetri a filo e rilievi topografici, fino ai più recenti sistemi GPS, rilievi fotogrammetrici digitali e rilievi LIDAR (Angeli et al., 2000; Gili et al., 2000; Kaab, 2000; Hervas et al., 2003; McKean & Roering, 2004). Anche l'interferometria SAR da piattaforma satellitare è stata applicata in numerosi casi, nell'ambito sia della ricerca che di applicazioni (Achache et al., 1995; Fruneau et al., 1996; Carnec et al., 1996; Rott & Siegel, 1999; Rott et al., 1999; Kimura & Yamaguchi 2000; Colesanti et al., 2003c; Berardino et al., 2003; Singhroy & Molch, 2004; Hilley et al., 2004; Casagli et al., 2005; Catani et al., 2005; Strozzi et al., 2005; Casagli et al., 2006a).

I contributi che l'analisi interferometrica satellitare può apportare, nei confronti della caratterizzazione temporale dei fenomeni di dissesto idrogeologico, sono dunque (Fig. 65):

- controllo su **area vasta** o **area locale** delle deformazioni superficiali;
- monitoraggio **remoto** delle deformazioni superficiali, in modo **non invasivo**, senza entrare in contatto diretto con l'area a rischio e con la possibilità di controllo di **aree caratterizzate da scarsa accessibilità**;
- studio dell'**evoluzione temporale** dei fenomeni con *back monitoring*;
- identificazione di **movimenti precursori** o indicatori di movimenti a dinamica lenta;
- osservazione della risposta dei fenomeni nei confronti di **fattori di innesco**;
- **individuazione di eventi** deformativi non emersi dalle analisi convenzionali;
- valutazione dell'**efficacia di interventi** di mitigazione;
- definizione di **scenari evolutivi** dei fenomeni che insistono su aree a rischio;
- possibilità di integrazione tra misure eseguite con strumentazione a terra e misure satellitari.

La caratterizzazione spaziale consiste nella ricostruzione della geometria del fenomeno di interesse, attraverso l'analisi e la combinazione delle componenti di deformazione superficiale osservate lungo le diverse geometrie e il confronto spaziale delle misure satellitari con i dati rilevati *in situ*. Tali attività sono finalizzate al miglioramento delle conoscenze sul fenomeno di interesse e alla comprensione del cinematismo che lo contraddistingue.

Dal punto di vista della caratterizzazione spaziale le maggiori potenzialità delle tecniche interferometriche multi-immagine sono legate alla possibilità di identificare le variazioni spaziali dell'area interessata dalle deformazioni e di ricostruire la geometria del fenomeno attraverso la combinazione delle modalità di acquisizione ascendente e discendente.

I contributi che l'analisi interferometrica satellitare può apportare nei confronti della caratterizzazione spaziale dei fenomeni di dissesto, sono nel dettaglio (Fig. 65):

- definizione di aree affette da *trend* di deformazione omogenei;
- individuazione della **estensione spaziale** del dissesto;
- possibilità di integrazione tra misure eseguite con strumentazione a terra e misure satellitari;
- ricostruzione della **componente verticale** e **orizzontale E-W** della deformazione, sfruttando la combinazione di dati rilevati lungo due geometrie di acquisizione.

5.2.1.1 'Back monitoring' dell'evoluzione temporale di un fenomeno

Un'analisi storica delle deformazioni avvenute sull'area in esame può essere eseguita mediante l'uso delle tecniche multi-interferogramma e dell'approccio di *back monitoring* (Cigna et al., under review; cfr. allegato). Grazie alla disponibilità degli archivi di immagini SAR satellitari acquisite sul territorio nazionale a partire dal 1992, è possibile infatti effettuare un controllo *a posteriori* dei fenomeni deformativi di interesse, caratterizzandoli sia dal punto di vista temporale che spaziale. Tra gli archivi di immagini SAR satellitari più rilevanti, va ricordato quello costituito da immagini ERS1/2 dell'ESA ricoprenti l'intervallo temporale 1992-2001 e, per fenomeni avvenuti negli ultimi anni, si fa invece riferimento all'archivio ENVISAT dell'ESA e all'archivio RADARSAT-1 della CSA, costituito a partire dal 2003 (cfr. 2.2).

Il *back monitoring*, mediante l'utilizzo di informazioni di deformazione ad alta accuratezza, permette di analizzare l'evoluzione nel tempo dei fenomeni, individuare eventuali *trend* deformativi rilevanti, riconoscere aree instabili, stimare lo stato di attività dei dissesti, riconoscere eventuali movimenti precursori, valutare la risposta del fenomeno alle variazioni dei fattori predisponenti e ricostruire la geometria dei fenomeni attraverso la combinazione delle modalità di acquisizione ascendente e discendente (Fig. 65). Un altro obiettivo del *back monitoring* consiste nella determinazione delle eventuali correlazioni temporali tra l'occorrenza dei fenomeni e nello sviluppo dei fattori di innesco, quali terremoti o precipitazioni particolarmente intense, ottenuta tramite il confronto e l'integrazione dei dati telerilevati con i dati *in situ*.

5.2.1.2 Interpretazione avanzata di serie temporali PSI

Nelle applicazioni a scala locale delle tecniche multi-interferogramma, è spesso eseguita l'analisi approfondita delle serie storiche di deformazione dei bersagli radar presenti sull'area di interesse, allo scopo di ricavare anche le informazioni sul comportamento del singolo bersaglio che non sono direttamente deducibili dal solo valore di velocità media di deformazione annuale e di mettere in luce la presenza di alterazioni del tasso di deformazione all'interno del periodo di monitoraggio analizzato. Infatti, tramite tale analisi si possono individuare accelerazioni, *trend* stagionali, movimenti precursori di eventi, alterazioni dei tassi di deformazione correlabili con l'attivazione o la riattivazione di fenomeni deformativi (Fig. 66).

L'analisi dell'evoluzione temporale delle velocità dei fenomeni di interesse può fornire delle indicazioni sullo stato di attività dei fenomeni e sull'eventuale presenza di movimenti significativi prima dell'evento analizzato, testimoniando l'esistenza di movimenti precursori che precedono la sua manifestazione più evidente. Lo studio delle deformazioni successive all'evento permette invece di verificare l'eventuale stabilizzazione delle aree colpite dall'evento o il persistere delle condizioni di instabilità, agevolando la formulazione di eventuali scenari di pericolosità futuri.

L'analisi delle serie storiche di deformazione è soprattutto necessaria sui bersagli a più bassa coerenza (ovvero quelli i cui termini di fase legati alle deformazioni si discostano maggiormente dal modello scelto in fase di elaborazione PSI), per valutare la loro significatività. Può infatti succedere che il bersaglio presenti un comportamento deformativo significativo, nonostante la sua coerenza risulti piuttosto ridotta a causa del discostarsi della serie storica dal modello di deformazione (generalmente lineare) imposto in fase di elaborazione (cfr. 2.4; Cigna et al., under review; cfr. allegato).

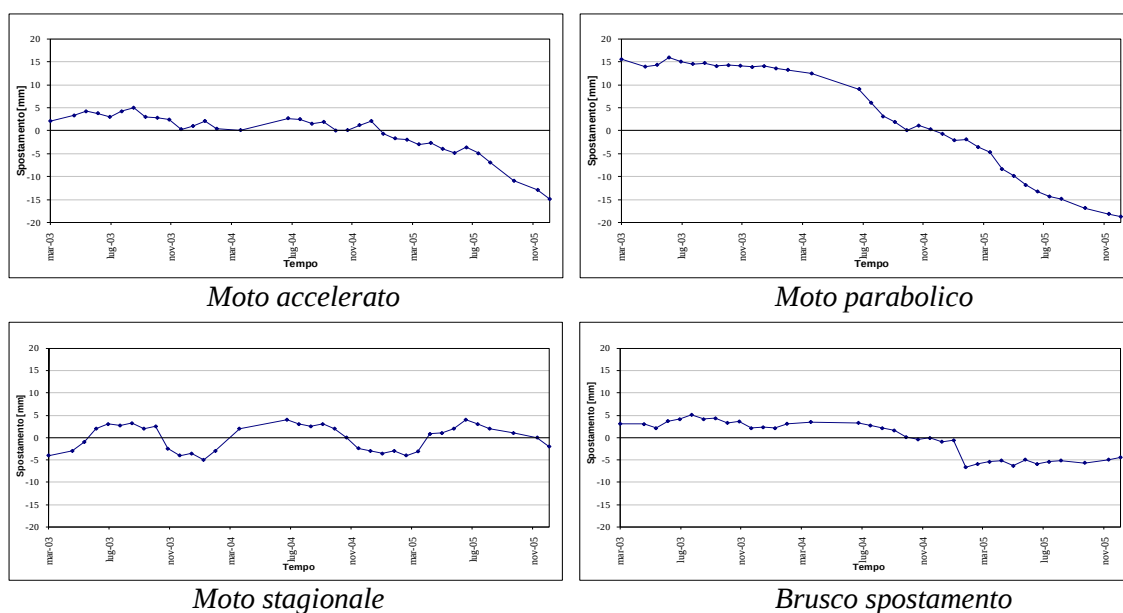


Fig. 66 - Esempi di serie storiche di deformazione di bersagli radar soggetti a moto accelerato, moto parabolico, moto stagionale, brusco spostamento in allontanamento.

Se nell'area di interesse si è verificato un evento deformativo durante l'intervallo di tempo coperto dalle acquisizioni, l'analisi delle serie storiche di deformazione può rapidamente mettere in luce la risposta temporale del sito nei confronti dell'evento stesso.

Nella Fig. 67 è riportato un esempio di serie storiche rappresentative di due diversi comportamenti registrabili in corrispondenza dei bersagli radar nei confronti della manifestazione di un fenomeno di dissesto.

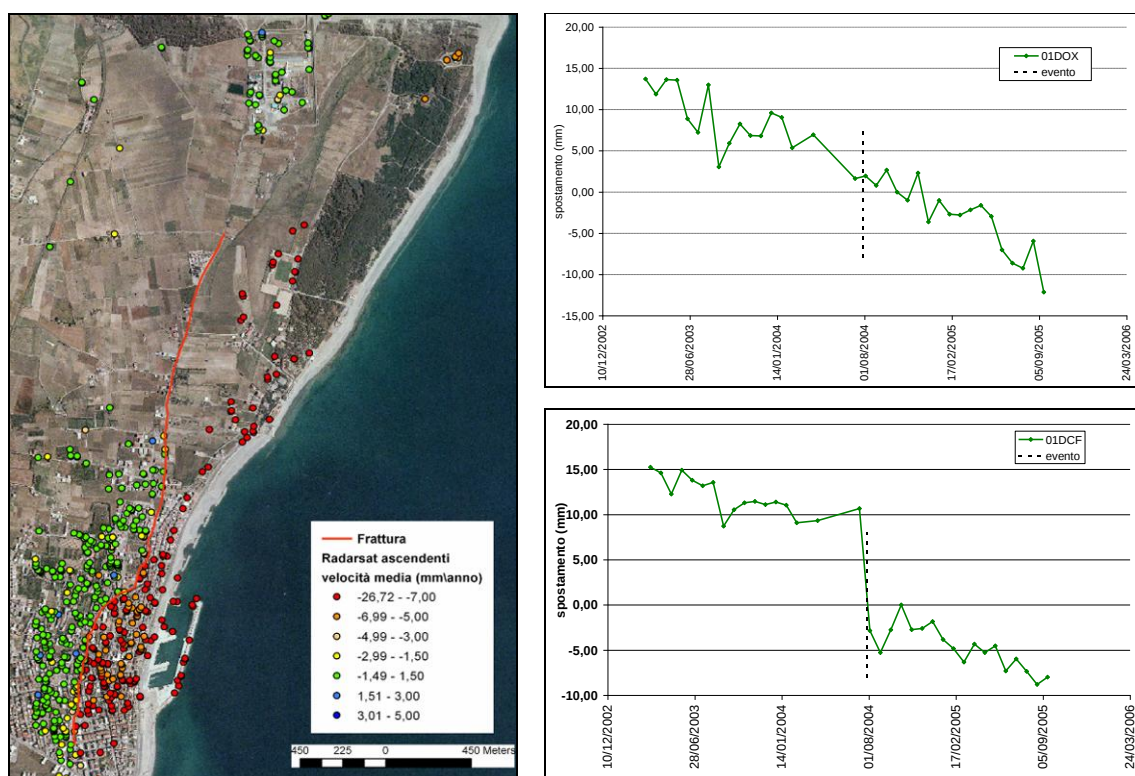


Fig. 67 - Distribuzione spaziale delle velocità medie dei PS RADARSAT (2003-2005) sull'area di Cirò Marina (KT) e serie storiche di deformazione di due PS ubicati a E (sotto) e a W (sopra) della frattura. Le serie storiche dei PS ubicati a E della frattura registrano un'improvvisa accelerazione del movimento in corrispondenza dell'evento del 28/07/2004 (Casagli & Farina, 2006 e 2007).

Se l'analisi sull'area di interesse ha messo in luce la presenza di diversi comportamenti deformativi in corrispondenza dei vari bersagli radar analizzati, può risultare utile individuare due o più categorie di comportamento, effettuare una classificazione dei bersagli ed eventualmente identificare e mappare zone omogenee in relazione al comportamento deformativo registrato da satellite.

Un approccio molto semplice per eseguire la classificazione dei comportamenti registrati all'interno delle serie storiche dei punti di misura, consiste nella distinzione degli stessi in stabili e instabili nei confronti dell'evento (Cigna et al., under review; cfr. allegato):

- **Bersagli stabili:** punti che non hanno risentito dell'evento deformativo all'interno del periodo di analisi. Le loro serie storiche non sono influenzate dall'evento: i bersagli non hanno subito spostamenti o sono caratterizzati da movimento costante nel tempo, in allontanamento o avvicinamento rispetto al satellite.
- **Bersagli instabili:** punti che risentono dell'evento, ovvero hanno subito un cambiamento nel diagramma spostamento-tempo in corrispondenza o in prossimità dell'evento e, in seguito ad esso, sono tornati alla condizione precedente o hanno subito un incremento del tasso di spostamento.

Tale approccio è stato implementato e testato per il centro abitato di Naro (AG) su dati RADARSAT-1 del 2003-2007 per la caratterizzazione temporale e spaziale del fenomeno di dissesto avvenuto nel Febbraio 2005, descritta nella sezione 5.2.2.

Per eseguire la caratterizzazione temporale di un dissesto può risultare inoltre utile confrontare i *trend* deformativi misurati dai bersagli radar in corrispondenza di periodi differenti. Questo tipo di analisi comprende sia il confronto dei *trend* deformativi ricavati da elaborazioni interferometriche relative a intervalli e *dataset* differenti, sia analisi mirate alla

scomposizione di un unico intervallo di misura in diversi sottointervalli e nella valutazione, all'interno di ciascuno di essi, del comportamento deformativo registrato.

Nel caso di diverse elaborazioni multi-interferogramma eseguite su intervalli temporali e *dataset* differenti (es. *dataset* ERS 1992-2000 e *dataset* RADARSAT 2003-2008), può essere utile confrontare la distribuzione dei valori di velocità registrati nei due intervalli e la perimetrazione delle aree interessate dalla deformazione, verificando l'eventuale presenza di modifiche nella distribuzione spaziale delle aree in movimento.

Nel caso in cui si vogliano mettere in luce le eventuali differenze del *trend* deformativo registrato in corrispondenza dei diversi sotto-intervalli temporali che compongono un unico periodo di monitoraggio satellitare, si può sottocampionare il periodo di analisi e si può eseguire il confronto della velocità media di deformazione registrata all'interno dei sotto-intervalli (Cigna et al., under review; cfr. allegato).

Questa tipologia di analisi è utile sia quando i dati e i rilievi a terra mettono in luce l'esistenza di diverse fasi deformative ricadenti all'interno dell'intervallo di tempo coperto dalle acquisizioni satellitari (Fig. 68), sia quando tale evidenza viene rilevata durante l'analisi preliminare di alcune serie storiche dei bersagli radar individuati sull'area di interesse. In questi casi, l'analisi dei diversi comportamenti deformativi può rispettivamente mostrare sia se esiste la corrispondenza tra le misure rilevate a terra e quelle satellitari, sia se i diversi *trend* deformativi sono stati registrati soltanto in particolari zone dell'area analizzata o nella sua totalità.

Il calcolo della velocità di deformazione all'interno dei sotto-intervalli può essere effettuato tramite l'uso della regressione lineare sui valori di spostamento appartenenti all'intervallo. Chiaramente, nella scelta degli intervalli di sotto-campionamento del *dataset*, deve essere tenuto in considerazione il fatto che i nuovi *trend* medi di deformazione ottenuti sono sensibilmente influenzati dal numero di acquisizioni ricadenti nei vari intervalli (Cigna et al., under review; cfr. allegato).

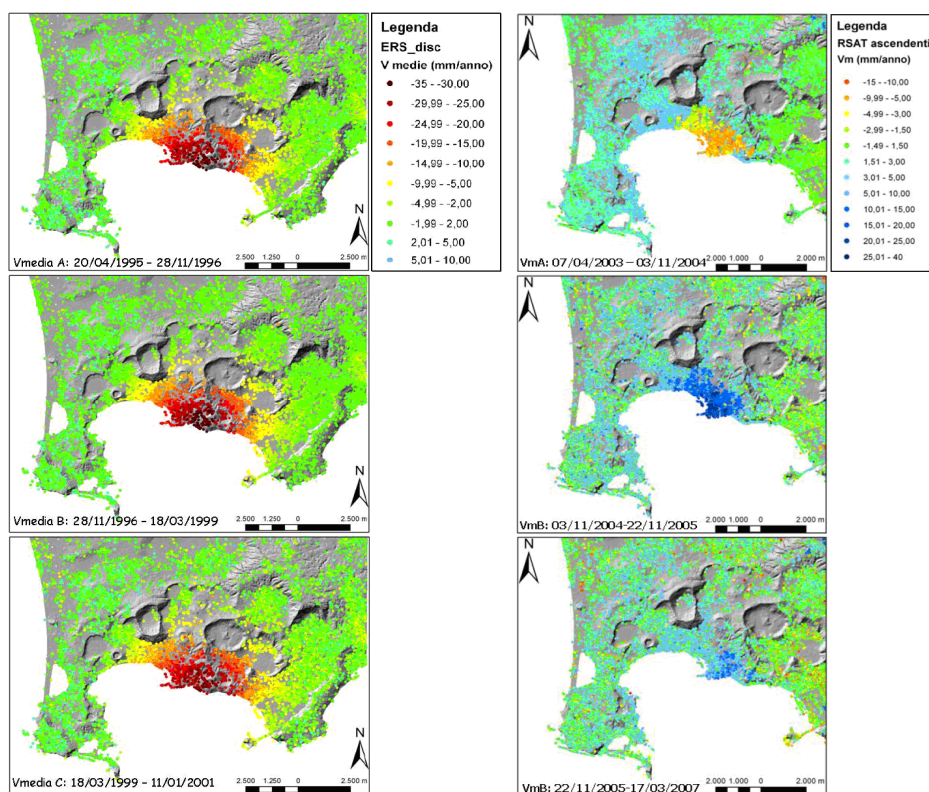


Fig. 68 - Velocità medie di deformazione sull'area dei Campi Flegrei (NA) misurate dal 1995 al 2001 lungo la LOS ERS1/2 discendente e dal 2003 al 2007 lungo la LOS di RADARSAT-1 ascendente (Casagli et al., 2008b).

5.2.1.3 Ricostruzione della geometria di un fenomeno

La ricostruzione della geometria di un fenomeno di dissesto consiste nella determinazione della effettiva direzione e della entità delle deformazioni che lo caratterizzano.

Per risalire al vettore di deformazione sono ovviamente necessarie misure lungo 3 diverse direzioni. La disponibilità di dati satellitari acquisiti lungo una o entrambe le diverse geometrie, ascendente e discendente, non è dunque sufficiente per stimare l'effettiva direzione di movimento. Per risolvere il problema è pertanto necessaria l'introduzione di una o più assunzioni, riguardante il piano o la direzione che contiene il movimento.

Se si hanno a disposizione dati di deformazione lungo una singola geometria di vista e, in casi particolari, è possibile effettuare un'assunzione sulla direzione di deformazione.

Ciò è possibile qualora i dati a terra o quelli storici forniscano chiare indicazioni sulla tipologia del fenomeno in esame e sulle sue caratteristiche geologiche e geomorfologiche. Ad esempio, è possibile che le deformazioni evolvano con principale direzione coincidente con la massima pendenza del versante (es. frane di scivolamento di traslazione) o con la verticale (es. subsidenza).

Sotto questa ipotesi, la ricostruzione della geometria del fenomeno si effettua tramite la proiezione delle misure satellitari (misurate lungo la LOS) sulla direzione reale di deformazione, secondo le modalità e i criteri illustrati nella sezione 4.3.2.

Se si hanno a disposizione dati di deformazione rilevati lungo entrambe le geometrie di vista, se si può ipotizzare di conoscere il piano su cui giace la principale componente di deformazione (ad esempio, nel caso di una frana di scivolamento di rotazione, il piano perpendicolare alla scarpata principale), si può ragionevolmente stimare l'effettiva direzione di spostamento, combinando le due diverse misure. In questo modo, per i punti che sono stati individuati quali bersagli radar in entrambe le geometrie di acquisizione, a partire dalla conoscenza delle due componenti registrate lungo le due orbite e attraverso alcune considerazioni geometriche, è possibile ricostruire il vettore di deformazione (Fig. 69 e Fig. 70). Le modalità e i criteri di combinazione delle misure lungo le geometrie ascendente e discendente sono descritte nella sezione 4.3.3.

Se il fenomeno deformativo che interessa l'area analizzata avviene in condizioni di deformazione piana (es. frane di scivolamento), può essere effettuata l'inversione del campo deformativo misurato in superficie per ricostruire il meccanismo di movimento. Per il caso specifico di una frana di scivolamento, l'inversione può essere effettuata utilizzando un metodo grafico per la stima della profondità e della forma delle superfici di scivolamento di fenomeni franosi (Fig. 71), come quello proposto da Carter & Bentley (1985) e da Cruden (1986).

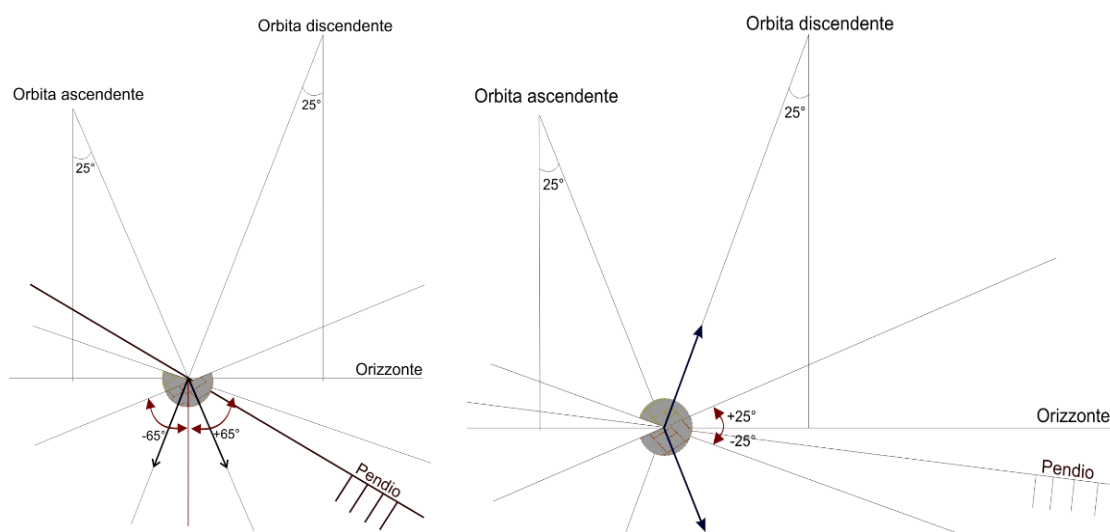


Fig. 69 - Determinazione delle possibili direzioni di movimento compatibili con i dati PS nelle zone A (destra) e B (sinistra) nell'abitato di Cavallerizzo (CS). In rosso è rappresentato il settore circolare in cui è contenuta la probabile direzione di deformazione (Casagli et al., 2006a).

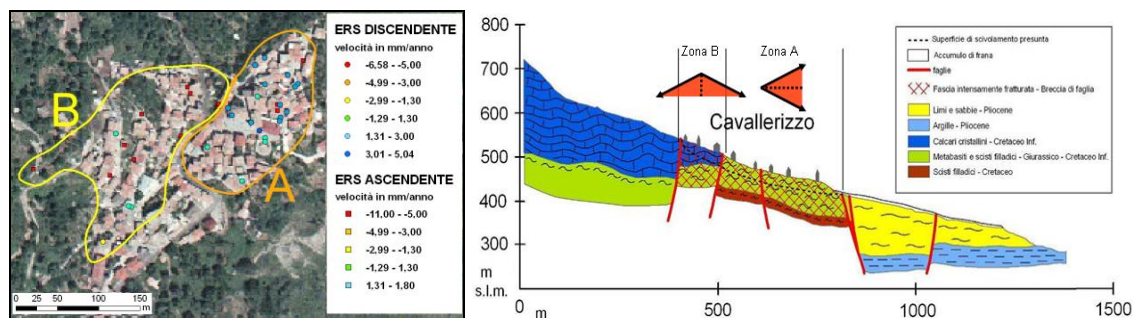


Fig. 70 - Divisione dell'abitato di Cavallerizzo (CS) in aree A e B, in funzione della morfologia e del campo di deformazione misurato mediante l'analisi dei dati ERS del periodo 1992-2000. Sezione geologica schematica della frana e indicazione delle possibili direzioni di movimento determinate secondo lo schema di fig. 69 (Casagli et al., 2006a).

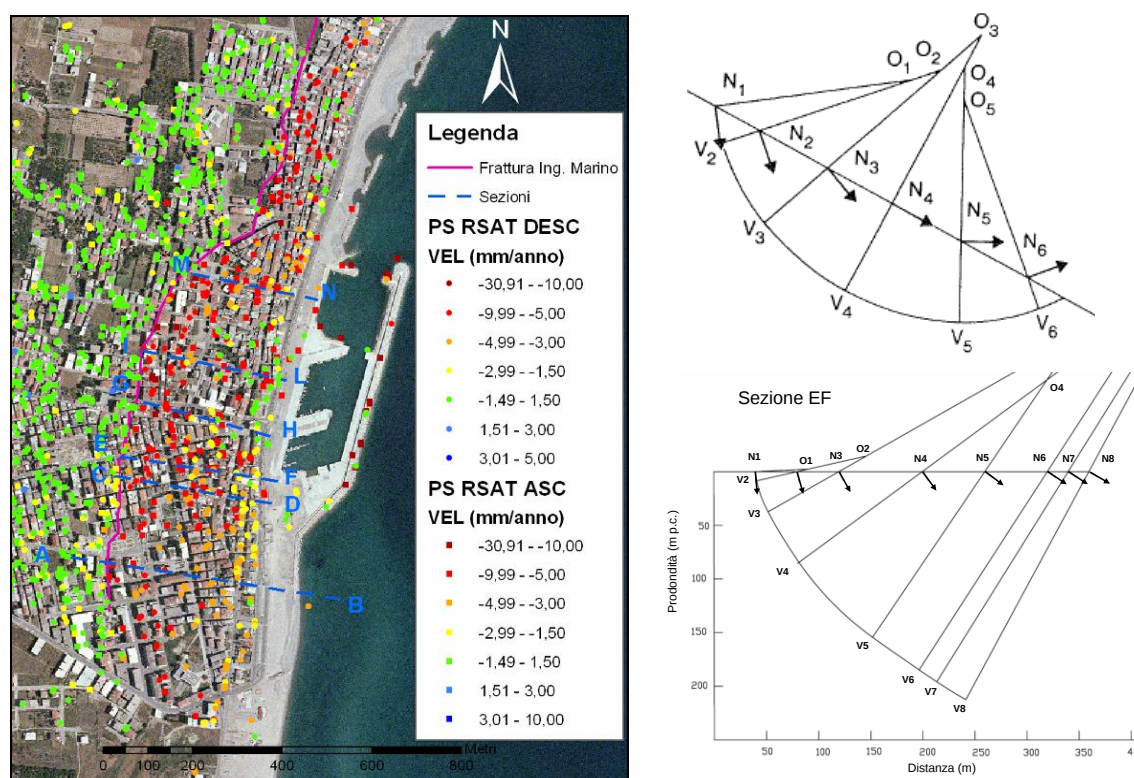


Fig. 71 - Analisi di dati RADARSAT-1 relativi al periodo 2003-2005 sull'abitato di Cirò Marina (KT): metodo grafico per ricostruire una superficie di scivolamento a partire da misure di deformazione rilevate in superficie (destra, in alto) (Carter & Bentley, 1985; Cruden, 1986); esempio di applicazione del metodo su vettori di deformazione ottenuti da combinazione di dati radar satellitari ascendenti e discendenti per la sezione EF (destra, in basso) (Casagli & Farina, 2006 e 2007).

5.2.1.4 Confronto e integrazione con dati ancillari e in situ

Al fine di ottenere una migliore comprensione dei fenomeni di interesse e facilitare l'interpretazione della loro dinamica, le misure di spostamento derivanti dall'analisi dei dati radar satellitari possono essere confrontate con dati di monitoraggio strumentale *in situ*, dati storici, dati bibliografici e ancillari.

Il confronto spaziale tra i dati radar e quelli provenienti da dati ancillari e tematici, consiste nella ricerca di correlazioni spaziali tra la distribuzione delle deformazioni registrate da satellite e ad esempio le informazioni circa la geologia, la geomorfologia o l'uso del suolo dell'area di interesse. Tale integrazione dei dati può così mettere in luce evidenti differenze di

comportamento corrispondenti alle diverse unità geologiche o geomorfologiche, elementi tettonici, presenza di fenomeni vulcanici nell'area di interesse (Fig. 72), elevati spessori di materiale comprimibile, oppure può esaltare chiare corrispondenze tra lo sviluppo di deformazioni e la costruzione di infrastrutture o scavi sotterranei in ambito urbano.

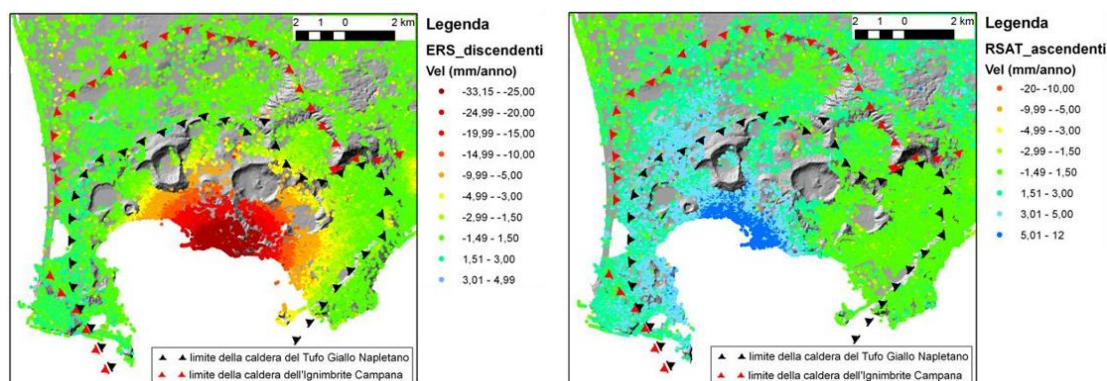


Fig. 72 - Confronto fra le velocità medie di deformazione dei PS ERS (1992-2001) e RADARSAT (2003-2007) e i limiti delle caldere sull'area dei Campi Flegrei (NA). I PS sono proiettati sull'hillshade ricavato dal DEM a 20 m (Casagli et al., 2008b).

Il confronto temporale tra i dati radar e dati ancillari, consiste sia nella valutazione della correlazione tra le misure radar satellitari e quelle ottenute mediante la strumentazione di controllo delle deformazioni a terra (fessurimetri, livellazione ottica, GPS, inclinometri, ecc.), sia nella ricerca di correlazioni temporali tra l'occorrenza o l'attivazione dei fenomeni e lo sviluppo dei fattori di innesco (terremoti, precipitazioni, ecc.).

Per valutare la correlazione tra le misure radar eseguite lungo la LOS del satellite e quelle ottenute mediante la strumentazione di controllo *in situ*, è necessario che i due dati vengano proiettati sulla stessa direzione. Infatti, per eseguire un confronto quantitativo tra le misure dei due sistemi di monitoraggio è necessario rendere confrontabili i due dati. La direzione su cui proiettare i dati può coincidere con la direzione su cui sono eseguite le misure con la strumentazione convenzionale o, più frequentemente, si può sfruttare la direzione di deformazione se si conosce la geometria di movimento che caratterizza l'area di interesse (Fig. 73). La procedura di proiezione dei dati sulla direzione reale di deformazione è descritta nella sezione 4.3.2.

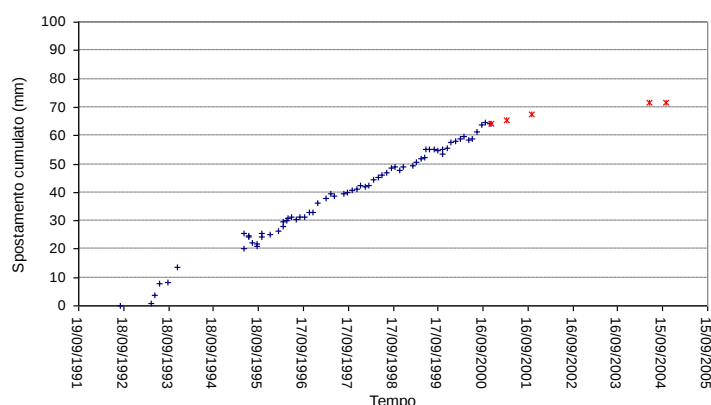


Fig. 73 - Confronto tra misure PS (croci blu) e inclinometriche (asterischi rossi) sul centro abitato di Cutigliano (PT) in corrispondenza di un inclinometro, proiettate lungo la presunta direzione di movimento (Casagli et al., 2005). Solo la componente di movimento registrata all'estremità del tubo in corrispondenza del piano di campagna può essere confrontata con i dati radar.

Come discusso precedentemente, la ricerca di eventuali correlazioni temporali tra la manifestazione dei fenomeni e l'occorrenza di terremoti o precipitazioni prolungate o particolarmente intense, può essere utile per caratterizzare il fenomeno di interesse e mettere in luce il suo legame con i fattori di innesco.

Per valutare le correlazioni esistenti tra le precipitazioni e le deformazioni del terreno, devono essere raccolti ed elaborati i dati di precipitazioni acquisiti dalle stazioni pluviometriche più vicine all'area di interesse, estraendo i valori che possono essere considerati rappresentativi delle condizioni meteorologiche del sito. Le serie storiche di deformazione dei bersagli radar identificati nell'area di interesse possono dunque essere confrontate temporalmente con i valori di precipitazione giornaliera in modo da evidenziare, se presenti, eventuali correlazioni tra eventi di pioggia particolarmente intensi o periodi molto piovosi e accelerazioni del tasso di deformazione dei bersagli (Fig. 74).

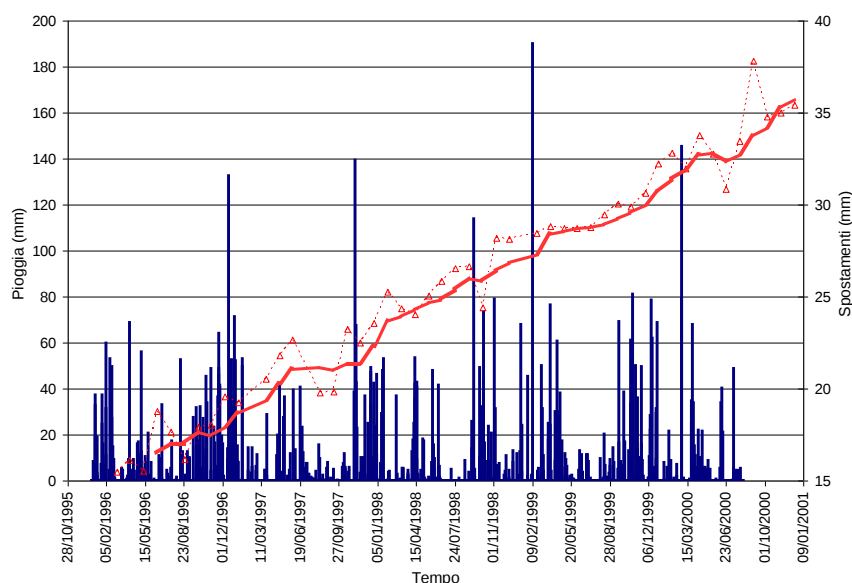


Fig. 74 - Analisi PS sull'abitato di Cutigliano (PT): precipitazioni giornaliere (barre blu) acquisite alla stazione pluviometrica di Casotti di Cutigliano, spostamenti cumulati (triangoli rossi) e loro media mobile a 4 campioni (linea rossa) ottenuti dall'analisi PS (Casagli et al., 2005).

5.2.2 Area test: Naro (Sicilia)

Al fine di supportare la progettazione degli interventi di protezione civile diretti a fronteggiare i dissesti geologici che hanno interessato il centro abitato di Naro nel Febbraio del 2005, è stata effettuata un'analisi interferometrica satellitare a scala locale, secondo l'approccio di caratterizzazione temporale e spaziale presentato all'interno della sezione 5.2.1 e nella Fig. 65.

L'abitato di Naro si sviluppa sul fianco SW di una collina costituita da una formazione calcarenitico-sabbiosa del Pliocene superiore, poggiante in continuità di sedimentazione, su terreni argillosi del Pliocene medio. Lo strato calcarenitico presenta uno spessore variabile (procedendo da SE verso NW, da circa 40 m a meno di 10 m), un'elevata porosità, un grado di cementazione variabile, intercalazioni di limi sabbiosi e intensa fratturazione (discontinuità sub-verticali).

Il comune di Naro è stato oggetto dell'Ordinanza del P.C.M. n°3450/2005 a seguito del grave fenomeno di dissesto che il 04/02/2005 ha interessato il centro abitato e si è manifestato con l'apertura di lesioni con ampiezza da pochi millimetri a 1-2 centimetri, negli edifici e nella sede stradale del centro abitato, nel settore N (via Vanelle, zona storica) e, in misura minore, in un quartiere della zona SE (via Gesù Maria) (Fig. 75). In entrambe le aree, nonostante la scadente qualità costruttiva degli edifici interessati dal dissesto, le lesioni hanno manifestato

l'esistenza di un significativo stato tensionale distribuito lungo la direzione NNW-SSE (Basile & Cocina, 2006).

L'evento del 2005 ha reso necessario l'approfondimento dello stato di conoscenza del territorio, per potere pervenire ad una corretta definizione del fenomeno, della sua estensione e del tipo di cinematismo che lo ha contraddistinto. La natura del dissesto è stato a lungo un argomento di discussione e, sin dal 2005, sono state proposte varie ipotesi alquanto diverse tra loro (Basile & Cocina, 2006; nonché studi per la realizzazione del PAI eseguiti nel 2006), alcune delle quali sono risultate poco probabili in virtù dei risultati della campagna di indagini geognostiche effettuata nel 2006 e dell'analisi PSI 1992-2007.

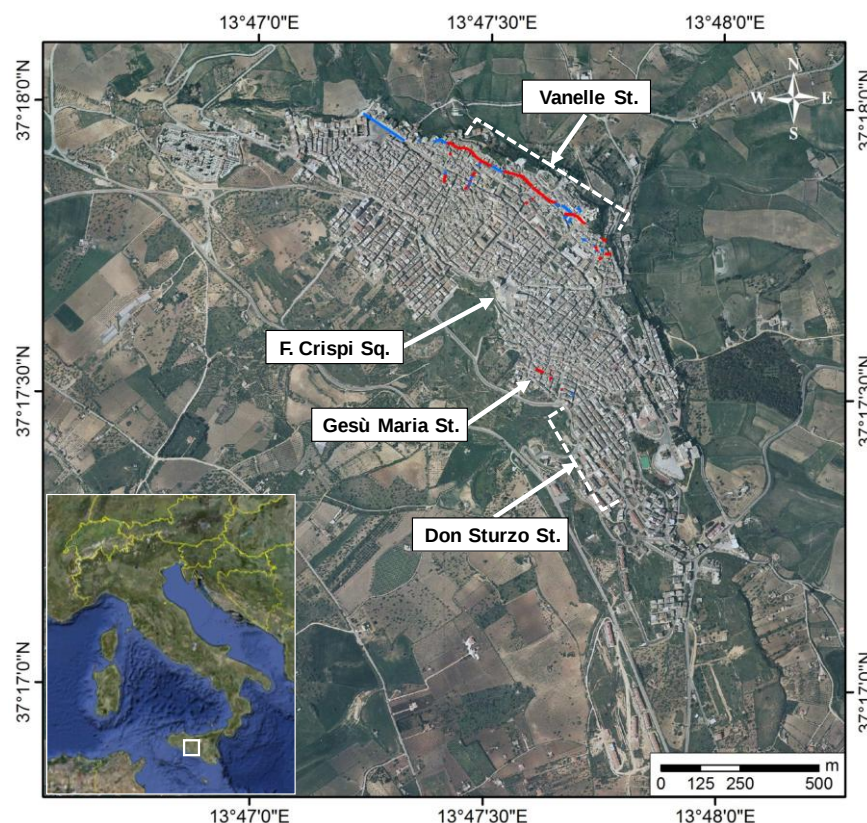


Fig. 75 - Localizzazione del centro abitato di Naro (Sicilia) e distribuzione delle principali fratture e lineazioni centimetriche (linee rosse) e millimetriche (linee blu) (Cigna et al., under review; cfr. allegato).

La possibilità di elaborare immagini SAR a partire dal 1992 ha consentito di effettuare un'analisi delle deformazioni pregresse e di conseguenza di identificare movimenti precursori dei dissesti attualmente in atto, studiare l'evoluzione nel tempo dei tassi di deformazione, comprendere quale fosse lo stato di attività del dissesto. I dati radar satellitari analizzati consistono in un *data stack* di immagini ERS1/2 acquisite in geometria discendente dal 1992 al 2000 e un *data stack* di immagini RADARDSAT-1 in geometria ascendente relative all'intervallo temporale 2003-2007, entrambi elaborati con la tecnica PSInSAR, sviluppata dalla TRE (TRE, 2008b).

L'analisi ha mostrato per il periodo 1992-2000 una generale stabilità del centro abitato e nessuna evidente correlazione tra la presenza di rilevanti velocità medie di deformazione e l'allineamento di via Vanelle. L'elaborazione satellitare relativa al periodo 2003-2007 ha invece evidenziato lo sviluppo di deformazioni significative e la presenza di movimenti più consistenti rispetto a quelli storici, sia nell'intorno della zona maggiormente danneggiata in prossimità di via Vanelle, sia nella zona SE dell'abitato (Cigna et al., 2010b e under review; cfr. allegati).

In corrispondenza della zona storica, sono state registrate deformazioni del suolo caratterizzate da velocità medie che hanno raggiunto valori massimi di 5-6 mm/anno e, nel settore SE del centro abitato, sono stati misurati spostamenti dell'ordine di 3-4 mm/anno su una zona abbastanza vasta, ubicata tra la viabilità principale e il versante E del centro urbano (Fig. 76).

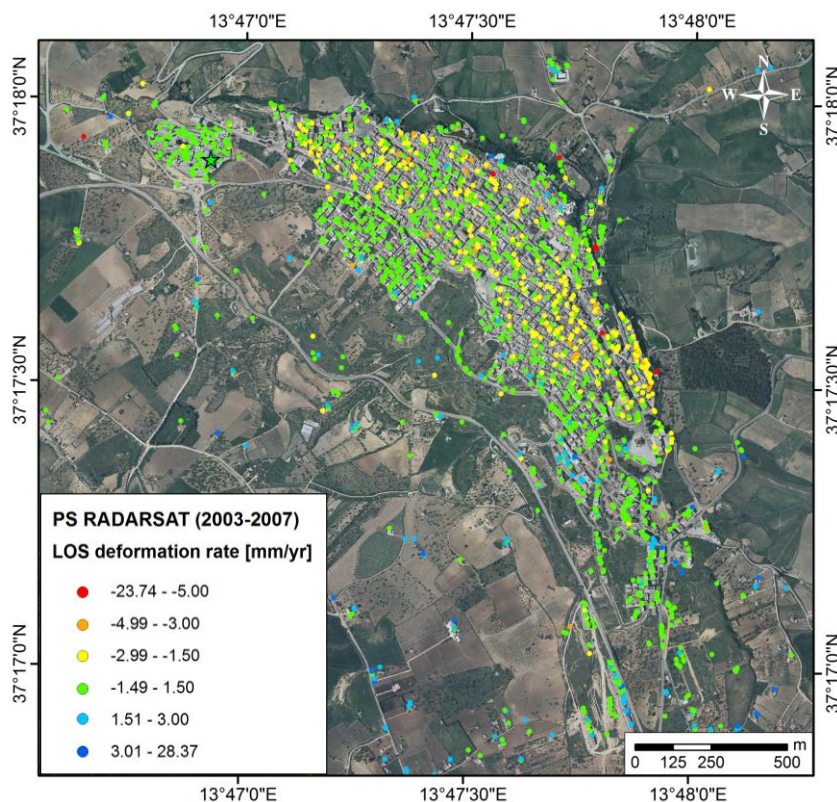


Fig. 76 - Distribuzione dei PS RADARSAT (geometria ascendente) relativi al periodo 2003-2007 sul centro abitato di Naro (Cigna et al., under review; cfr. allegato).

Al fine di identificare le aree che hanno risentito dell'evento del 04/02/2005, cercare l'eventuale presenza di movimenti precursori e valutare le variazioni dei tassi di deformazione legate all'occorrenza della riattivazione, è stata effettuata un'analisi delle serie storiche di deformazione di tutti i PS individuati in corrispondenza dell'abitato, secondo la metodologia descritta nella sezione 5.2.1.2 (Cigna et al., under review; cfr. allegato). Questa ha mostrato che un numero consistente di caposaldi, ubicati non solo a valle della frattura di via Vanelle ma anche nella zona centrale dell'abitato, possiede serie storiche di deformazione che mostrano un'alterazione del tasso di movimento tra le acquisizioni a cavallo dell'evento. Quest'alterazione si manifesta sottoforma di un brusco movimento in allontanamento al sensore (dell'ordine di 5-10 mm), o come una variazione temporanea o permanente del tasso di deformazione (Fig. 77). L'estensione areale del dissesto è dunque risultata decisamente maggiore di quella mappata in occasione dei sopralluoghi e comprende anche aree ubicate nella porzione occidentale dell'abitato, tra via Laudicina, via Vallone e via Gaetani e comprendente parte di piazza Padre Favara e nella zona centro-orientale, tra il versante est del rilievo su cui sorge il centro abitato e via Moro e proseguendo verso NW lungo il versante, fino a via Lauria (Fig. 78).

Il risultato di tale analisi è stato confrontato con l'assetto geomorfologico del centro abitato ed ha rivelato un'evidente correlazione tra la presenza delle diverse scarpate e rotture di pendenza di origine morfo-tettonica presenti all'interno del versante calcarenitico-argilloso-sabbioso ed il repentino cambio del comportamento deformativo registrato in corrispondenza

dei PS. Tale circostanza ha messo in luce un diverso *trend* deformativo a monte e a valle delle scarpate, confermando l'ipotesi connessa con la presenza nel centro abitato di alcune superfici tettoniche lungo le quali sono avvenuti cedimenti sub-verticali di porzioni del blocco calcarenitico su cui esso si sviluppa (Fig. 78).

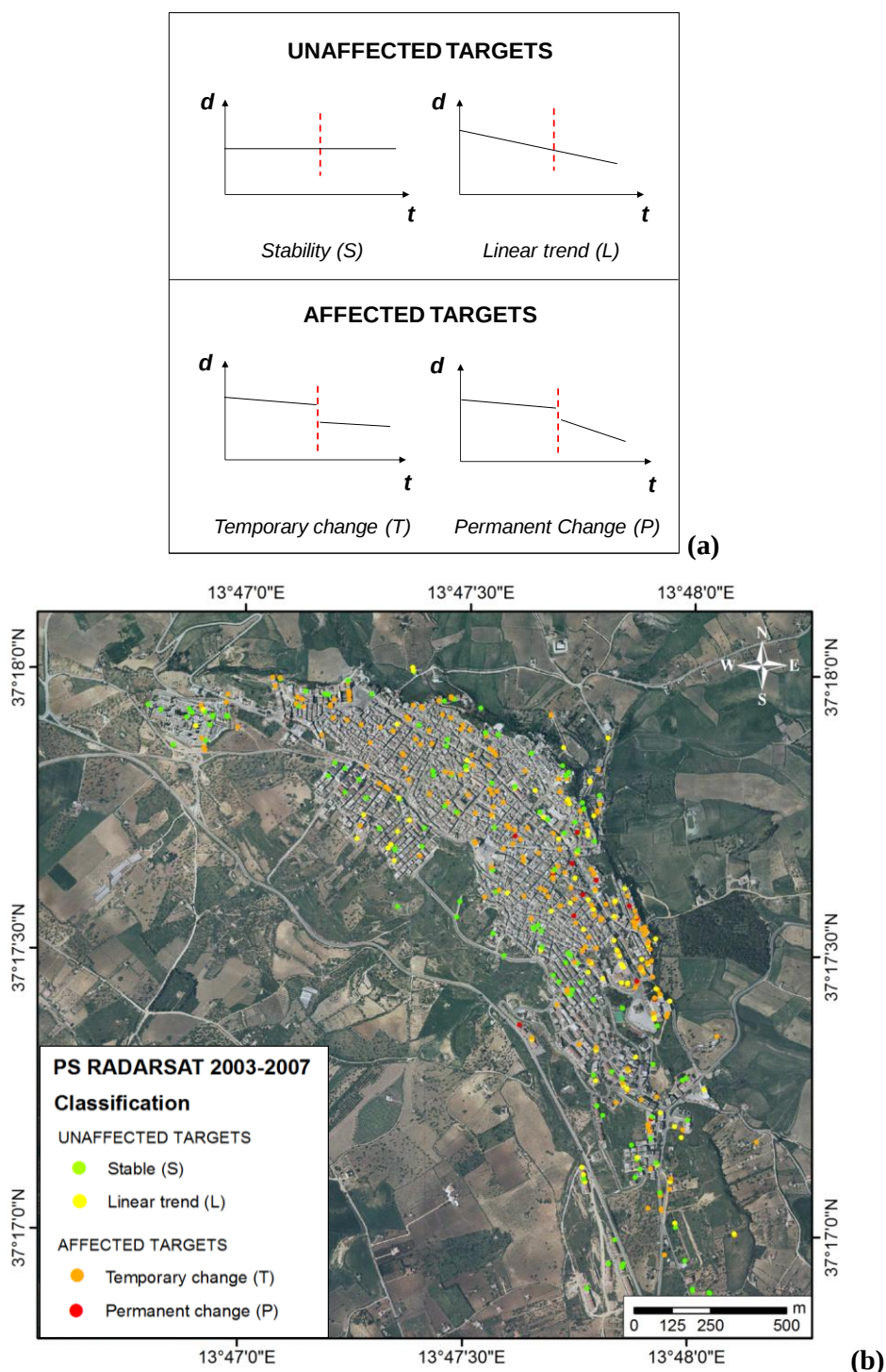


Fig. 77 - Analisi avanzata delle serie storiche di deformazione dei PS RADARSAT 2003-2007 sul centro abitato di Naro. Schematizzazione del comportamento dei PS appartenenti alle classi S, L, T e P in relazione all'evento (linea rossa tratteggiata) (a) e classificazione dei PS in funzione della risposta della serie storica all'evento del 04/02/2005 (b) (Casagli et al., 2009a; Cigna et al., under review; cfr. allegato).

L'analisi delle serie storiche dei PS ha inoltre mostrato la presenza di movimenti precursori dell'evento già a partire dal Settembre del 2004, ovvero prima della sua manifestazione più evidente. Tali movimenti consistono nell'accelerazione temporanea dei tassi di deformazione fino a valori prossimi ai 40-50 mm/anno. Questa condizione ha messo in luce che l'evento in questione, non è avvenuto in modo repentino, bensì la deformazione ha avuto inizio ben prima del 04/02/2005.

L'analisi ha infine mostrato come, in seguito all'evento, gran parte dei PS abbia modificato la sua velocità media, assumendo valori meno elevati. Questa condizione, riscontrata principalmente nella zona SE del centro abitato e, in modo meno marcato, in prossimità della via Vanelle, ha indicato una probabile stabilizzazione di gran parte del centro abitato in seguito all'evento.

I risultati delle analisi eseguite hanno dunque avvalorato l'ipotesi connessa alla presenza di alcune discontinuità sub-verticali, di probabile origine tettonica, che dislocano la parte alta dell'abitato. Inoltre, i sopralluoghi e gli studi effettuati hanno messo in luce che le lesioni non sono di neo-formazione e che le loro diverse riattivazioni storiche non sono legate né a eventi sismici, né a eventi pluviometrici particolarmente intensi.

L'integrazione tra analisi InSAR e misure convenzionali ha condotto alla realizzazione di una mappatura definitiva delle aree a rischio, redatta concordemente e coordinatamente con il gruppo di lavoro del DRPC – Regione Siciliana. Tale prodotto è stato ottenuto integrando le informazioni desumibili dai rilievi geologici, geomorfologici e strutturali *in situ*, effettuati in collaborazione con i tecnici del DRPC durante i numerosi sopralluoghi, con le indicazioni desumibili dall'analisi satellitare, ottenendo il risultato mostrato nella Fig. 79 e stabilendo in ciascuna area a rischio i necessari interventi di mitigazione:

- zona A: area con manifestazioni di fratturazione nel terreno e negli edifici, accertate e incontrovertibili, storicamente conosciuta e periodicamente ricorrente, direttamente interessata dalla frattura del 04/02/2005;
- zona B: area con manifestazioni di fratturazione nel terreno e negli edifici riconducibili all'evento del 04/02/2005;
- zona C: area con manifestazioni di fratturazione nel terreno e negli edifici, isolate e discontinue, non direttamente riconducibili all'evento del 04/02/2005.

Per maggiori approfondimenti riguardanti l'analisi di caratterizzazione temporale e spaziale eseguita per il centro abitato di Naro si consultino i seguenti lavori scientifici allegati alla presente Tesi di Dottorato:

- CIGNA F., DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., CASAGLI N. (under review) - *Advanced radar-interpretation of InSAR time series for mapping and characterization of geological processes*. Submitted to Natural Hazards and Earth System Sciences on 26 October 2010. Minor revision requested on 18 December 2010. Manuscript: nhess-2010-371.
- CIGNA F., DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., CASAGLI N. (2010b) - *InSAR time-series analysis for management and mitigation of geological risk in urban area*. In: Proc. IGARSS2010, Hawaii, USA. pp. 1924-1927.
- CASAGLI N., CIGNA F., DEL CONTE S., LIGUORI V. (2009a) - *Nuove tecnologie radar per il monitoraggio delle deformazioni superficiali del terreno: casi di studio in Sicilia*. Geologi di Sicilia, Anno XVII, vol.3, 17-27.
- CASAGLI N., CIGNA F., DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., MANNO G. (2008) - *Detection and monitoring of ground deformation in urban areas with advanced multi-interferogram techniques*. 33° International Geological Congress, Oslo. August 6-14th, 2008.

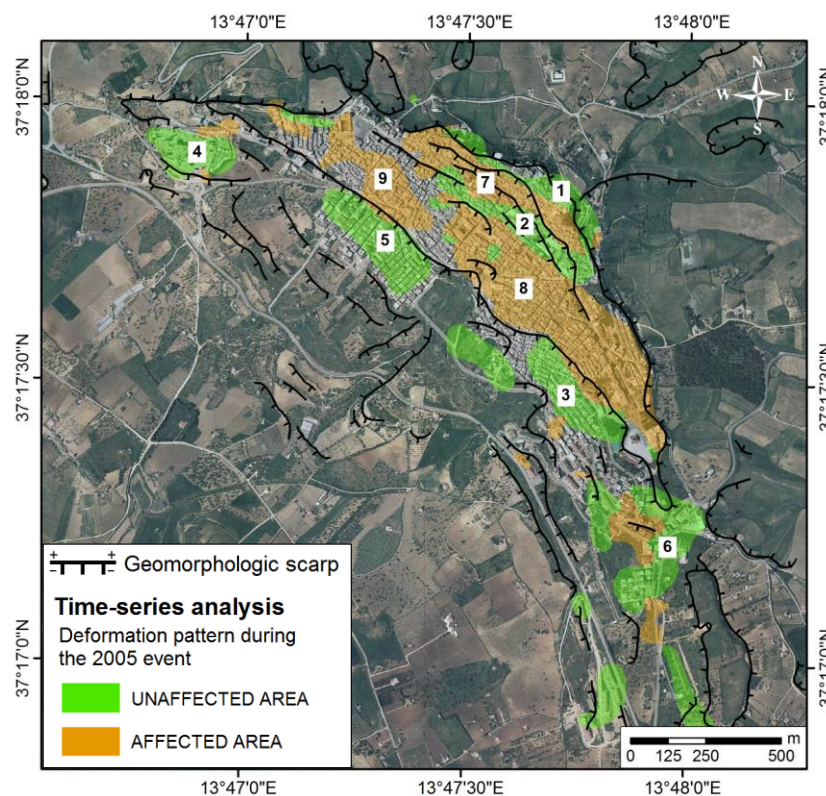


Fig. 78 - Aree a comportamento omogeneo nei confronti dell'evento del 04/02/2005, individuate tramite la classificazione delle serie storiche dei PS. Sono inoltre rappresentate le principali scarpate geomorfologiche (Casagli et al., 2009a; Cigna et al., under review; cfr. allegato).

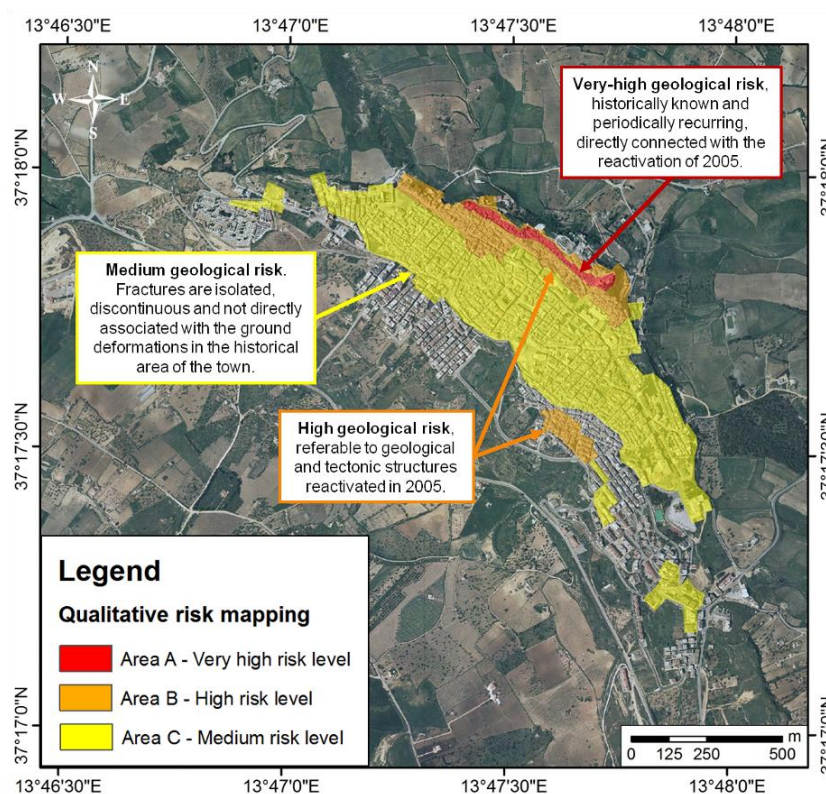


Fig. 79 - Versione definitiva della perimetrazione del centro abitato di Naro come recepita dal DRPC – Regione Siciliana (modificata da Casagli et al., 2009a; cfr. allegato).

5.2.3 Area test: Morelia (Messico)

Nell'ambito del periodo di formazione e collaborazione svolto dalla scrivente presso la *Division of Marine Geology and Geophysics* dell'*University of Miami*, è stata implementata l'analisi di dati radar satellitari per la mappatura rapida e la valutazione della pericolosità connessa con la subsidenza nell'area urbana di Morelia, ubicata lungo l'arco vulcanico Messicano (MVB, *Mexican Volcanic Belt*). La suddetta analisi è stata eseguita secondo l'approccio di caratterizzazione temporale e spaziale presentato all'interno della sezione 5.2.1 e nella Fig. 65.

La città di Morelia si trova all'interno di un'antica depressione fluvio-lacustre del settore centrale del MVB (Fig. 80), attivo fino al Pleistocene superiore, ed è affetta, da circa 20-30 anni, da fenomeni di subsidenza differenziale, dovuti al processo di consolidamento dei sedimenti, accelerato da estrazioni incontrollate di acqua dal sottosuolo e controllato dal sistema regionale e locale di faglie normali del MVB. Testimonianza del controllo tettonico delle deformazioni è lo sviluppo di danni lungo direzioni prevalentemente parallele al sistema regionale di faglie, orientato in direzione E-W, nonché il risultato delle numerose indagini geologiche, geofisiche e paleosismologiche condotte da parte dell'UMSNH, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. La subsidenza in corso in tali aree non è di tipo lineare (costante nel tempo) né uniformemente distribuita ed è caratterizzata da deformazioni lente, continue nel tempo e asismiche. La combinazione dei suddetti fenomeni è stata di conseguenza recentemente definita PSCF, *Process of Subsidence-Creep-Fault* (Garduño-Monroy et al., 2001).

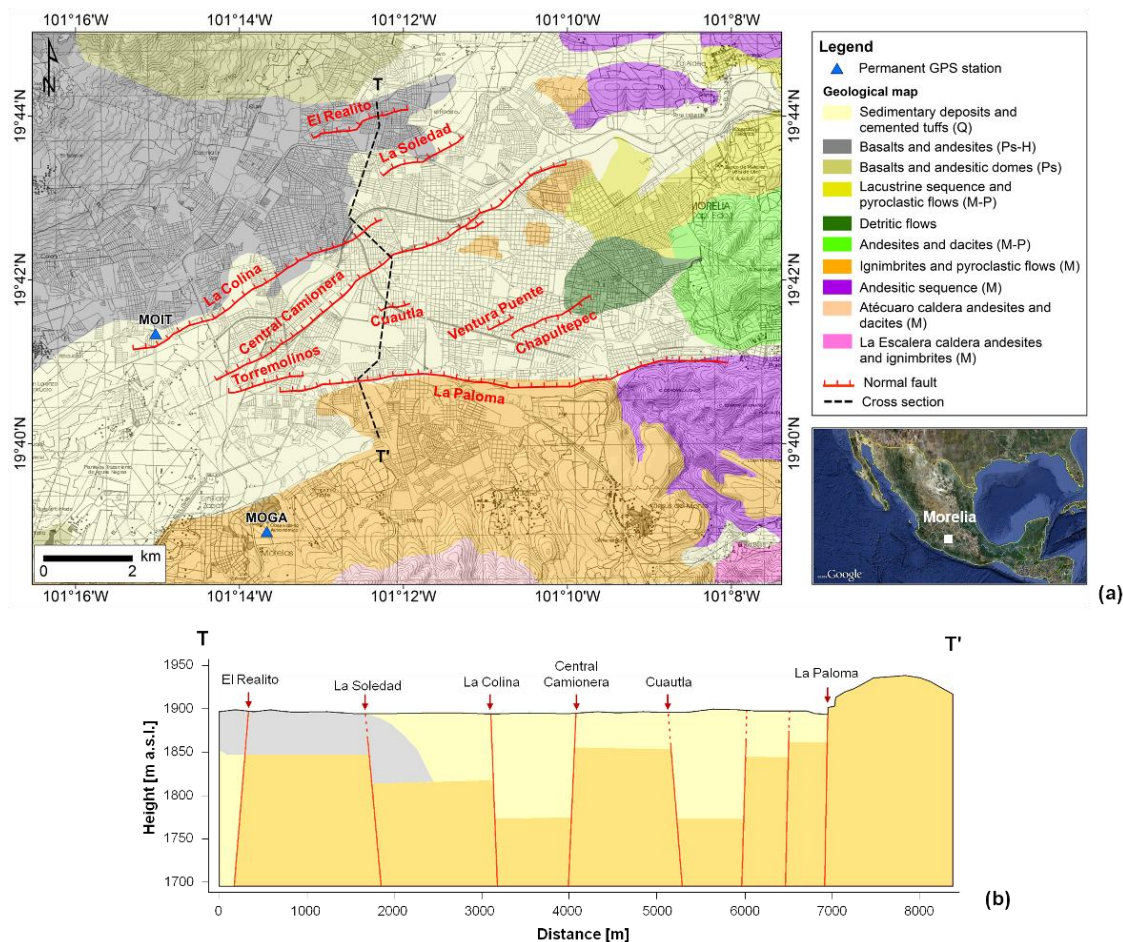


Fig. 80 - Localizzazione geografica e carta geologica dell'abitato di Morelia (a). Sezione geologica schematica T-T' (b).

La presenza di faglie all'interno o al di sotto della falda acquifera può innescare compattazione verticale differenziale nel caso di estrazioni di acqua, a causa del diverso spessore dei materiali compressibili che compongono l'acquifero, riduzioni differenziali del livello della falda attraverso le discontinuità e inoltre variazioni laterali della compressibilità dell'acquifero.

Cause ed estensione delle aree interessate dalle deformazioni sono note nelle aree urbane principali del MVC, quali Città del Messico, tuttavia sono ancora in fase di studio in città minori quali appunto l'abitato di Morelia. Sulla suddetta area è stato analizzato un *data stack* di immagini ENVISAT (2003-2009) acquisite in geometria discendente (Cabral-Cano et al., 2010a; cfr. allegato). Tali dati sono stati elaborati sia mediante l'approccio tradizionale per coppie di immagini (DInSAR) sia secondo più avanzate tecniche multi-interferogramma e, i risultati delle analisi, sono stati validati e confrontati con le misure GPS (2008-2010) acquisite sulle stesse aree da parte dell'UMSNH, nonché integrati con i risultati delle campagne GPR (*Ground Penetrating Radar*) e tomografia sismica portate avanti dalla stessa UMSNH. Benché l'uso di misure GPS garantisca un elevatissimo campionamento temporale delle deformazioni e l'eventuale individuazione di componenti stagionali su singole stazioni installate all'interno dei centri abitati, tali misure necessitano tuttavia dell'integrazione con dati InSAR sia per potere coprire l'intera area urbana e studiare anche la variabilità spaziale dei campi deformativi, sia per coprire un intervallo di monitoraggio più ampio (2003-2009) rispetto a quello disponibile presso le stazioni GPS e poter valutare la risposta del terreno, in termini di accelerazione o decelerazione dei tassi di deformazione, alle estrazioni di acqua dal sottosuolo ed alla progressiva ricarica della falda.

Come già riportato da Farina et al. (2007), due diverse tipologie di movimento possono essere individuate all'interno dell'area urbana di Morelia: basse ma concentrate deformazioni lungo direzioni circa NE-SW o E-W, parallelamente alle strutture tettoniche presenti nell'area (*La Paloma, Central Camionera e La Colina, La Soledad*), e *pattern* sub-circolari di diametro di alcuni metri, corrispondenti all'ubicazione dei principali pozzi di estrazione.

In Fig. 81 è riportata una mappa di deformazione ricavata da un interferogramma ottenuto dall'elaborazione delle acquisizioni del 27/12/2008 e del 03/10/2009 (280 gg), caratterizzate da *baseline* spaziale di 29 m, mentre in Fig. 82 è mostrata la mappa di deformazione ricavata mediante analisi PSI dei dati 2003-2010 (Cabral-Cano et al., 2010a; cfr. allegato). Le mappe rivelano chiaramente la presenza di deformazioni nell'area urbana, con valori massimi di circa 5-6 cm per l'analisi DInSAR e valori massimi di 50-60 mm/anno nella mappa PSI 2003-2009.

La distribuzione dei valori di fase rivela una chiara corrispondenza tra bruschi cambiamenti di comportamento deformativo e la presenza di strutture tettoniche all'interno del centro abitato, legate alle brusche differenze di spessore di sedimenti compressibili caratterizzanti i due lati opposti di ciascun elemento strutturale e, in alcuni casi, da componenti molto lente di deformazione legate alla tettonica locale.

Per maggiori approfondimenti riguardanti l'analisi di mappatura rapida e valutazione della pericolosità residua eseguita per il centro abitato di Morelia, e per informazioni riguardo un'analisi analoga eseguita su Città del Messico, si consultino i seguenti lavori scientifici allegati alla presente Tesi di Dottorato:

- CABRAL-CANO E., ARCINIEGA-CEBALLOS A., DÍAZ-MOLINA O., CIGNA F., OSMANOGLU B., DIXON T., DEMETS C., VERGARA-HUERTA F., GARDUÑO-MONROY V. H., ÁVILA-OLIVERA J. A., HERNÁNDEZ-QUINTERO E. (2010a) - *Is there a tectonic component on the subsidence process in Morelia, Mexico?* Land subsidence, associated hazards and the role of natural resources development, Hydrological Sciences Journal, Red Book Series. K. Prince et al. Ed. pp. 164-169.
- CABRAL-CANO E., OSMANOGLU B., DIXON T., WADOWINSKI S., DEMETS C., CIGNA F., DÍAZ-MOLINA O. (2010b) - *Subsidence and fault hazard maps using PSInSAR and permanent GPS networks in central Mexico.* Land subsidence, associated hazards and the role of natural resources development, Hydrological Sciences Journal, Red Book Series. K. Prince et al. Ed. pp. 255-259.

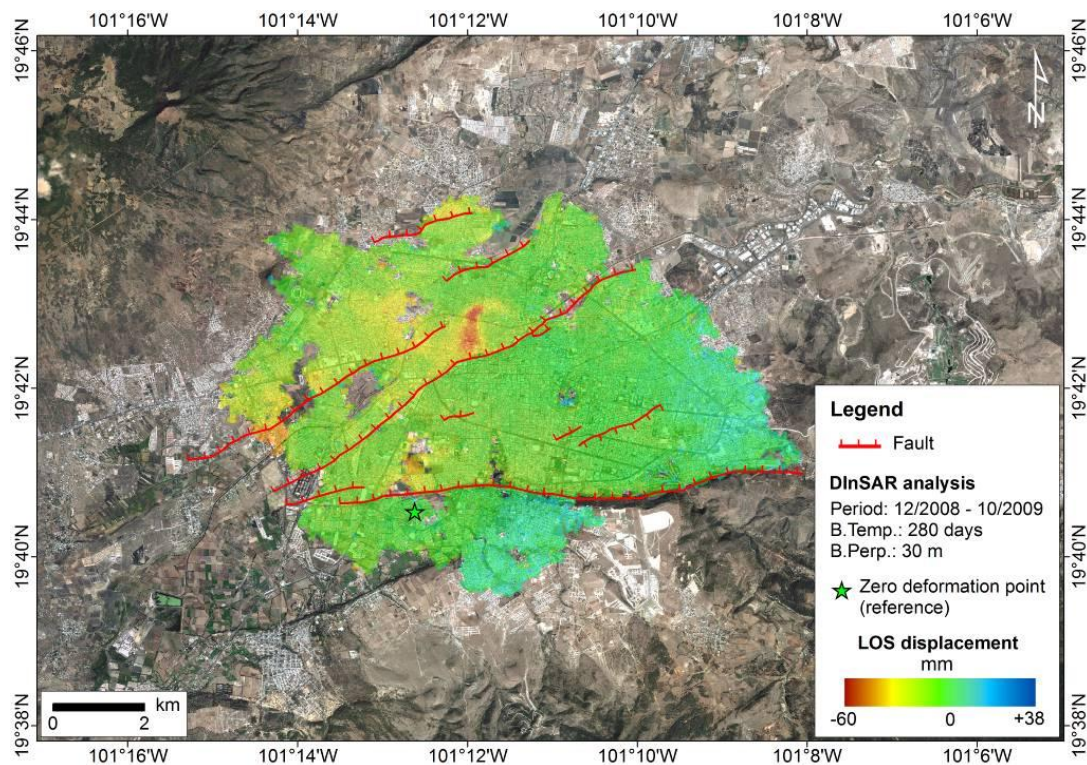


Fig. 81 - Mappa di deformazione 2008-2009 derivante da analisi DInSAR sull'area urbana di Morelia. L'interferogramma è stato ottenuto mediante l'elaborazione di due immagini ENVISAT acquisite in geometria discendente il 27/12/2008 ed il 03/10/2009.

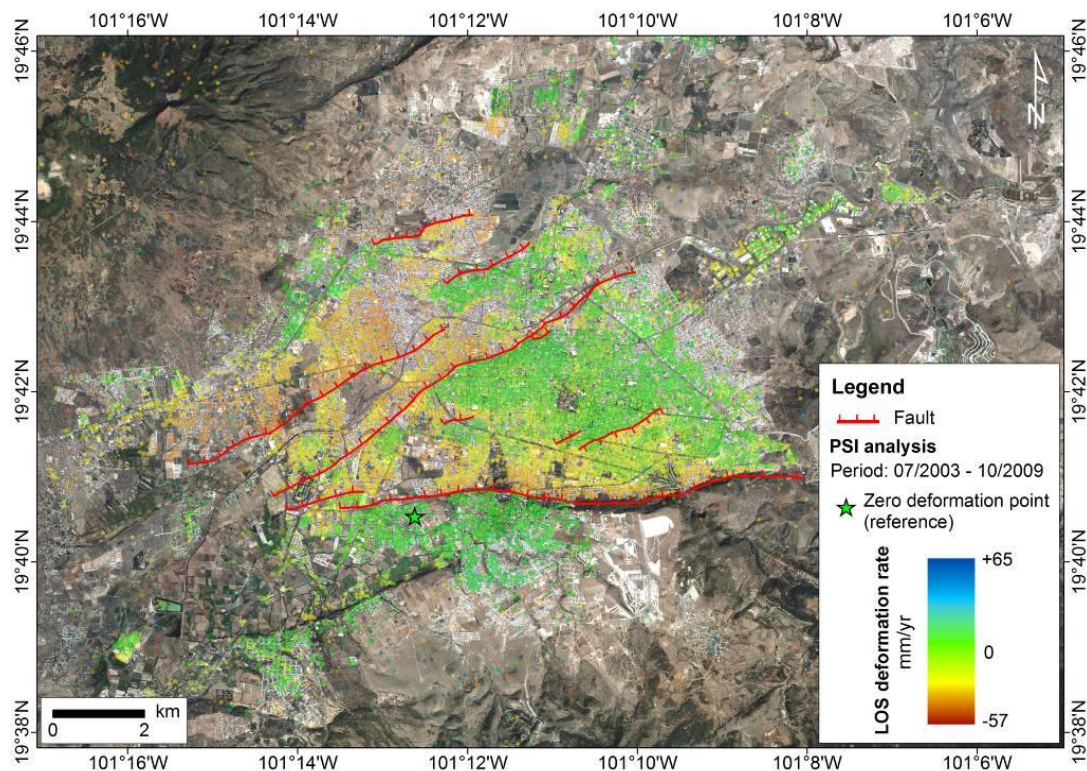


Fig. 82 - Mappa di deformazione ricavata da analisi PSI di dati ENVISAT 2003-2009 acquisiti in geometria discendente sull'area urbana di Morelia (Cabral-Cano et al., 2010a; cfr. allegato).

5.3 Mappatura rapida dei dissesti e valutazione del rischio residuo

Il concetto di ‘mappatura rapida’ (*rapid mapping*), introdotto e definito nel piano strategico dell’*Emergency Response Core Service*, prodotto dall’*Implementation Group* del progetto GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), consiste nella produzione di una rappresentazione sintetica e strutturata delle informazioni considerate necessarie e sufficienti per conoscere un evento previsto o in atto, e delle risorse necessarie per contrastarne gli effetti, assistere la popolazione ai fini di protezione della vita umana e ristabilire le condizioni di vita. I prodotti dell’attività di *rapid mapping* possono essere raggruppati in due differenti famiglie:

- mappe di riferimento (*reference maps*): mappe derivate da dati pre-esistenti o ottenute da simulazioni pre-evento. Contengono informazioni cartografiche, sulla popolazione, sull’assetto economico, sulle infrastrutture, ecc. Possono essere sia prodotti di attività ordinaria (*on-routine*) che il risultato di specifiche indagini.
- mappe di valutazione (*assessment maps*): mappe che derivano direttamente dai dati *in situ* e immagini acquisite durante la crisi o indirettamente ottenute attraverso modelli numerici e dal confronto tra informazioni post-crisi e di archivio. Sono prodotte in caso di crisi (*on-demand*).

Il *rapid mapping* è il risultato e la sintetizzazione rapida delle attività di individuazione e caratterizzazione temporale e spaziale dei fenomeni di dissesto (cfr. 5.2) e consiste dunque nella perimetrazione delle aree a rischio e dei danni conseguenti al manifestarsi di dissesti, sia a scala localizzata sia a larga scala, nonché nel controllo e mappatura dell’eventuale rischio residuo.

In seguito alla manifestazione di un dissesto, è fondamentale riuscire a individuare in tempi ristretti le aree colpite dall’evento stesso, i danni subiti dalle infrastrutture e le aree a rischio. La comprensione rapida dell’estensione del fenomeno di interesse costituisce infatti una delle prime attività volte alla gestione e al superamento dell’emergenza, perché può dare informazioni utili circa le aree in cui è necessario attuare misure strutturali o non strutturali di mitigazione del rischio e può segnalare le aree soggette a rischi residui.

Mentre le misure in tempo reale delle deformazioni possono essere acquisite installando sull’area in movimento, anche in maniera speditiva, strumentazione *in situ* convenzionale, spesso è impossibile ottenere informazioni sulle condizioni di stabilità dell’area prima del verificarsi di un evento catastrofico che generi un’emergenza, senza quindi poter verificare la presenza o l’assenza di spostamenti pregressi e le possibili correlazioni del fenomeno con fattori innescanti. La possibilità di accedere a dati SAR di archivio permette di ovviare a questo limite fornendo misure di deformazione in tempo differito, aiutando a identificare l’estensione dell’area instabile anche in zone esterne a quelle in cui si sono verificate rotture o spostamenti riconoscibili a occhio nudo, ma dove tuttavia sono stati registrati movimenti millimetrici possibili precursori di ulteriori fenomeni deformativi.

I contributi che l’analisi interferometrica satellitare può apportare nei confronti della mappatura rapida dell’estensione dell’area interessata dai dissesti e dei danni, sono dunque:

- controllo su **area vasta** delle deformazioni superficiali;
- monitoraggio **remoto** delle deformazioni superficiali, in modo **non invasivo**, senza entrare in contatto diretto con l’area a rischio e con la possibilità di controllo di **aree caratterizzate da scarsa accessibilità**;
- individuazione delle **aree interessate dal dissesto**, anche se non riconoscibili mediante analisi convenzionali;
- valutazione delle **condizioni di stabilità** dell’area **precedenti** al verificarsi del dissesto;
- identificazione delle **aree omogenee** nei confronti degli aspetti geomorfologici e rispetto al comportamento deformativo.

La valutazione del rischio residuo comprende le attività inerenti la gestione del rischio in fase di post-evento e, in particolare, la valutazione delle condizioni di stabilità e rischio residuo di un’area in seguito ad un dissesto e l’eventuale aggiornamento della perimetrazione delle aree a rischio. La fase post-crisi un dissesto idrogeologico riguarda tutte le attività successive al

verificarsi di un evento calamitoso e dirette al ripristino della normalità, cioè delle condizioni di vita pre-esistenti all'evento stesso, al fine di garantire condizioni permanenti e omogenee sia di salvaguardia della vita umana che dei beni, perseguendo anche, ove possibile e attraverso opportuni interventi, la riduzione della pericolosità e della vulnerabilità.

Il quadro delle attività necessarie all'implementazione della fase post-crisi si sviluppa sia nel campo del tempo differito che in quello del tempo reale (come definiti dalla Dir. P.C.M. del 27/02/2004) e gli elementi che concorrono a definirlo sono:

- Identificazione e mappatura dei danni diretti e indiretti provocati dall'evento calamitoso, relativi alla vita umana o ai beni economici.
- Valutazione delle condizioni di rischio residuo, attraverso l'analisi delle condizioni di pericolosità e di vulnerabilità residue presenti dopo il verificarsi dell'evento, legate ad esempio al persistere di condizioni di instabilità.
- Ripristino delle strutture e infrastrutture, realizzazione di interventi strutturali atti al ritorno alle condizioni di normalità.
- Utilizzo dell'informazione data dagli eventi trascorsi per migliorare la gestione futura del rischio (*lesson-learned*) tramite la revisione e l'aggiornamento dei scenari di rischio e dei conseguenti piani di emergenza e la modellazione del fenomeno basata sull'evoluzione osservata durante l'emergenza.
- Realizzazione di interventi di mitigazione per ridurre gli effetti del pericolo stesso, la vulnerabilità degli elementi a rischio e l'impatto degli eventi futuri.
- Valutazione dell'efficacia degli interventi di mitigazione realizzati in fase di emergenza.

Il contributo che le tecniche di interferometria SAR possono dare nella fase post-crisi per la gestione del rischio idrogeologico è molteplice.

Grazie alla possibilità di effettuare delle analisi sulle condizioni di stabilità sfruttando i dati di archivio e recenti acquisiti dai satelliti con sensori SAR a bordo, le tecniche interferometriche multi-immagine consentono di valutare le condizioni di rischio residuo dopo il verificarsi di un evento distruttivo. Spesso infatti la possibilità di ulteriori riattivazioni dei fenomeni richiede l'installazione di sistemi di monitoraggio per valutare l'esistenza di movimenti residui che possano evolvere in successive deformazioni.

L'uso delle tecniche InSAR da satellite può inoltre essere sfruttato per un'analisi più a lungo termine per la valutazione dell'efficacia degli interventi di mitigazione realizzati a seguito di un evento distruttivo. Grazie all'elevata precisione della stima dei movimenti, al carattere non invasivo della tecnica e all'entità modesta delle eventuali deformazioni normalmente presenti dopo la realizzazione degli interventi, l'analisi della stabilità dell'area in dissesto mediante interferometria da satellite può risultare efficace.

Un ulteriore utilizzo delle tecniche interferometriche da piattaforma satellitare nella fase post-crisi è quello connesso al ripristino delle strutture e infrastrutture coinvolte e danneggiate da fenomeni di dissesto o rese inagibili a tal punto da dover essere ricostruite o ri-localizzate altrove. In quest'ottica, permettendo in area urbana di ottenere misure con una densità tale da identificare e monitorare le deformazioni che interessano anche singoli edifici, l'interferometria può essere di aiuto nelle fasi decisionali per la scelta dell'ubicazione di insediamenti da ri-localizzare a seguito di dissesti oppure a supporto della selezione di percorsi alternativi per la viabilità danneggiata dagli eventi.

I contributi che l'analisi interferometrica satellitare può apportare nei confronti della valutazione delle condizioni di rischio residuo in seguito ad un evento sono dunque:

- valutazione dell'esistenza di eventuali **deformazioni superficiali residue**;
- valutazione dell'**efficacia degli interventi** strutturali di mitigazione del rischio eseguiti in seguito ad un evento, tramite l'analisi della stabilità dell'area interessata dal dissesto;
- ricerca di aree stabili o, controllo di aree già predisposte, per la **ri-localizzazione** degli elementi a rischio.

5.3.1 Metodologia

La metodologia proposta per la mappatura rapida dei dissesti e del rischio residuo è basata sull'utilizzo integrato di dati cartografici tradizionali e immagini telerilevate, acquisite sia da sensori ottici e analizzate mediante la fotointerpretazione, sia da sensori radar ed elaborate con analisi interferometriche differenziali o multi-interferogramma. Il suo obiettivo principale è quello dell'individuazione delle aree colpite dal dissesto di interesse, delle aree a rischio residuo e, in particolare, di eventuali aree ancora in movimento. La finalità secondaria di questa analisi consiste nell'eventuale formulazione degli interventi di mitigazione più idonei, quali la delocalizzazione delle infrastrutture e degli elementi a grave rischio, il divieto di nuova edificazione, l'esecuzione di controlli periodici della stabilità delle strutture interessate da lesioni, il monitoraggio degli edifici segnalati instabili, l'approfondimento dello stato di conoscenza volto alla definizione delle linee di intervento più opportune per fronteggiare lo stato di dissesto.

I prodotti ottenuti dalla mappatura rapida consistono dunque nell'identificazione delle aree interessate dal dissesto, dei danni e del rischio residuo. Questi prodotti si ottengono mediante l'individuazione dell'area interessata dal movimento, la comprensione della sua estensione spaziale e delle sue caratteristiche evolutive.

L'approccio metodologico, schematizzato all'interno della Fig. 83, è composto dalle fasi di:

- Mappatura rapida dei dissesti
- Valutazione del rischio residuo

Ciascuna delle suddette fasi sarà descritta e discussa all'interno delle sezioni seguenti.

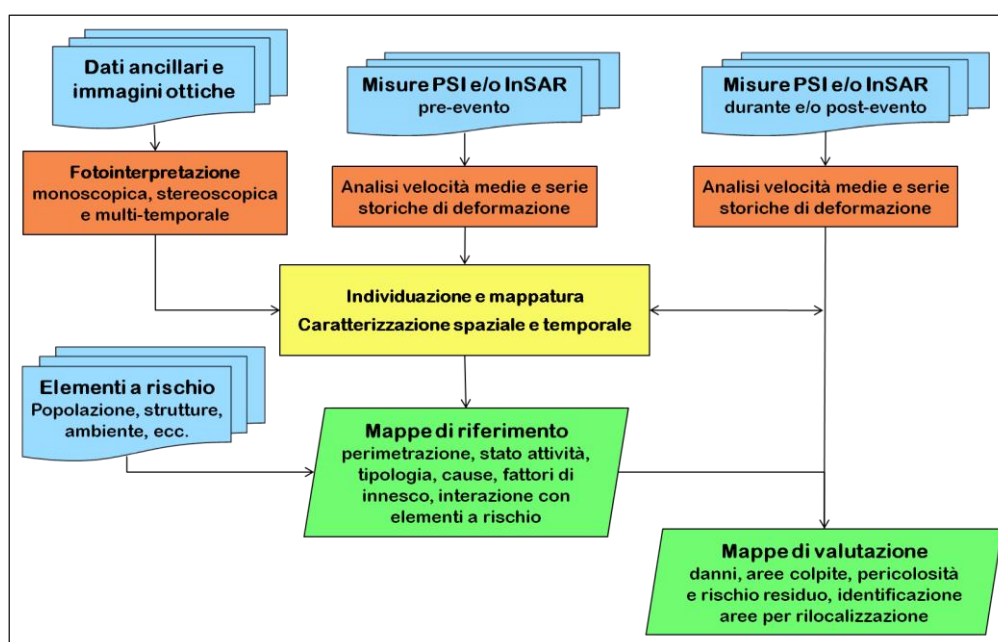


Fig. 83 - Principio di funzionamento della metodologia di radar-interpretazione per la mappatura rapida dei dissesti e la valutazione della pericolosità e rischio residui.

5.3.1.1 Mappatura rapida dei dissesti

L'analisi integrata dei dati interferometrici satellitari e dei dati ancillari è lo strumento da utilizzare per l'individuazione delle aree interessate dal dissesto. La distribuzione delle deformazioni ricavata mediante un'analisi interferometrica può mettere in luce la presenza di aree che sono state interessate da deformazioni superficiali pur non avendo manifestato sul terreno evidenti segni di dissesto quali l'apertura di lesioni, e non essendo quindi state rilevate per mezzo delle analisi convenzionali.

In riferimento ai risultati di un'analisi multi-interferogramma, l'individuazione delle aree instabili può essere eseguita mediante l'analisi della distribuzione del campo di velocità media di deformazione registrato in corrispondenza dei bersagli radar individuati sull'area di interesse, secondo i criteri illustrati nella sezione 5.1.1.1.

Un'analisi più approfondita dei fenomeni di interesse può essere effettuata sfruttando le informazioni di deformazione contenute all'interno delle serie storiche dei bersagli radar (Fig. 84). Tale analisi consente infatti di ottenere indicazioni sul comportamento dei vari punti di misura non direttamente deducibili dal solo valore di velocità media di deformazione annuale e di mettere in luce la presenza di accelerazioni del tasso di spostamento, bruschi movimenti o alterazioni correlabili con l'attivazione o la riattivazione dei fenomeni deformativi (cfr. 5.2.1.1 e 5.2.1.2).

A scopo di mappatura rapida, oltre alle analisi multi-interferogramma è utile eseguire analisi interferometriche differenziali, grazie alle quali possono essere efficacemente individuati *trend* deformativi significativi anche in zone con elevata presenza di vegetazione (Fig. 85).

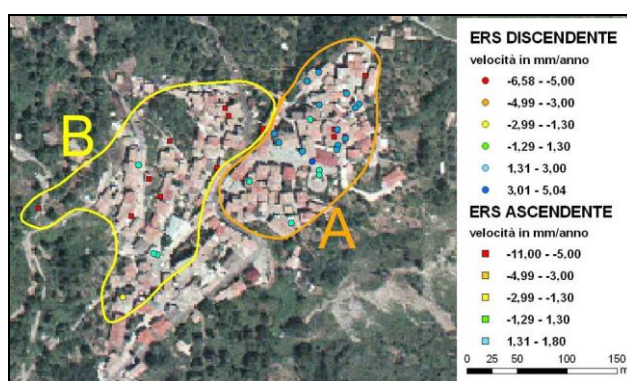


Fig. 84 - Mappatura dell'abitato di Cavallerizzo (CS) in due zone con diverso campo di deformazione e con differenti condizioni morfologiche, sia in termini di acclività sia di esposizione dei versanti. Risultato della mappatura effettuata mediante l'analisi dei dati ERS (Casagli et al., 2006a).

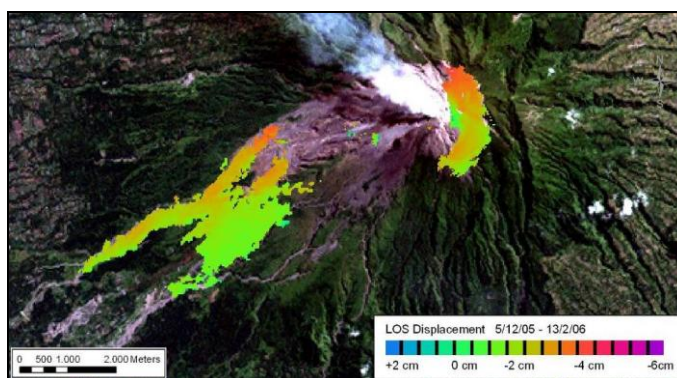


Fig. 85 - Mappa di deformazione del vulcano Merapi (Indonesia), ottenuta da elaborazione DInSAR delle immagini ENVISAT 05/12/2005-13/02/2006. L'analisi evidenzia sia la presenza di deformazioni connesse con l'attività eruttiva del 2006 sia movimenti precursori dello stesso (Casagli et al., 2006b).

Nel caso in cui sia possibile identificare le probabili direzioni di movimento dei fenomeni in esame, si possono proiettare i valori di spostamento misurati lungo la LOS del satellite sulla direzione di deformazione reale, secondo le modalità e i criteri di proiezione illustrati nelle sezioni 4.3.2 e 5.2.1.3. Inoltre, se per l'area di interesse sono disponibili analisi interferometriche eseguite su immagini acquisite lungo le due diverse geometrie, ascendente e discendente, si può effettuare la loro combinazione per risalire alle componenti reali del vettore

di deformazione nella direzione verticale e orizzontale E-W, secondo i criteri mostrati nelle sezioni 4.3.3 e 5.2.1.3.

Un contributo all'interpretazione finalizzata alla mappatura rapida è fornito dalla fotointerpretazione di foto aeree e immagini ottiche satellitari ad alta risoluzione (*HR images*), quali le immagini LANDSAT o SPOT, o ad altissima risoluzione (*VHR images*), quali quelle acquisite dai satelliti IKONOS o QUICKBIRD. Il loro utilizzo in configurazione stereoscopica o monoscopica per la mappatura dei fenomeni di dissesto idrogeologico è ormai uno strumento operativo comunemente utilizzato.

A scopo di mappatura rapida, la principale utilità delle acquisizioni ottiche consiste nella possibilità di osservare e analizzare i cambiamenti subiti dall'area indagata nell'intervallo di tempo che intercorre tra diverse acquisizioni, attraverso il confronto diretto tra immagini acquisite in momenti differenti, sia foto aeree sia immagini ottiche satellitari. In particolare, è utile fare riferimento a un'immagine acquisita prima dell'evento e un'altra successiva a esso, in modo da perimetrare l'area interessata dal fenomeno, definire lo scenario di danno associato all'evento, valutare l'evoluzione delle condizioni di dissesto, individuare alcune delle principali modificazioni antropiche e naturali del territorio (Fig. 86).

L'analisi delle acquisizioni ottiche ad alta risoluzione può inoltre permettere di identificare la zona di possibile arretramento o espansione dell'area interessata dalle deformazioni e dare informazioni su probabili scenari di evento futuri. Oltre ai prodotti ottenibili mediante le tradizionali analisi stereoscopiche o monoscopiche, le immagini ottiche satellitari, grazie alla multispettralità delle riprese e alle diverse bande dello spettro elettromagnetico analizzate, permettono di discriminare diverse tipologie di superficie e di riconoscere gli aspetti tessiturali del territorio, quali lineazioni tettoniche e morfologiche (Fig. 87). Per evidenziare la presenza delle aree instabili possono dunque essere utilizzate diverse composizioni delle bande dello spettro o algoritmi di estrazione di informazioni correlabili con la presenza di deformazioni.

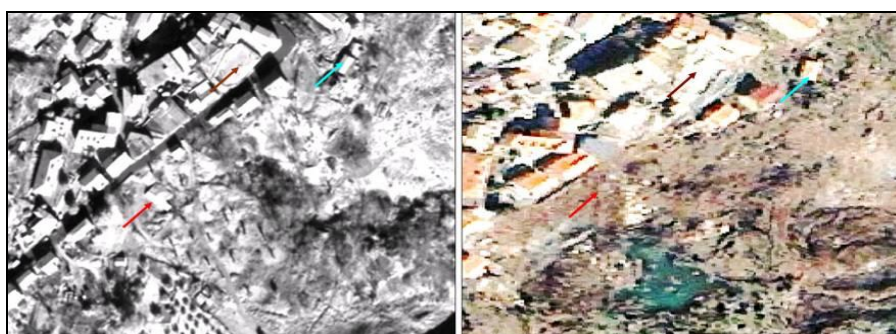


Fig. 86 - Confronto fra l'immagine QUICKBIRD del 03/01/03 (sinistra) e l'immagine IKONOS del 16/03/05 (destra) sull'area di Cerzeto (CS). Le differenze mettono in evidenza le modifiche del territorio indotte dal dissesto del 07/03/05 (Casagli et al., 2006a).

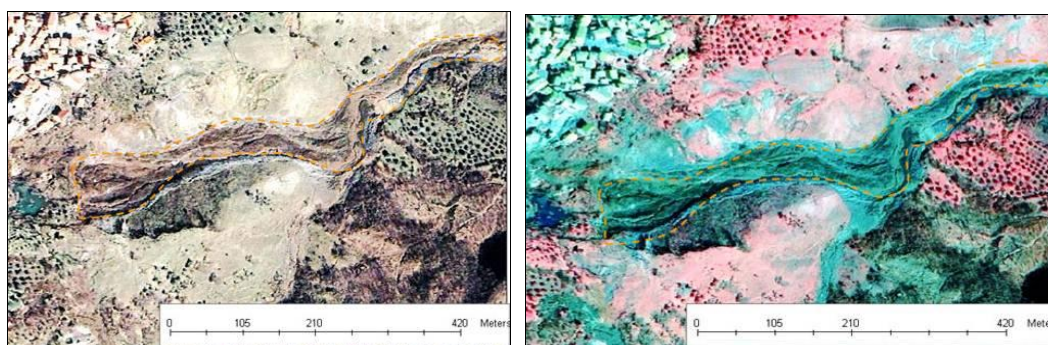


Fig. 87 - Immagine IKONOS del 16/03/05 sull'area della frana di Cerzeto (CS) con indicato in tratteggio l'area dell'accumulo di materiale della frana del 07/03/05. Sinistra: composizione delle bande spettrali 321; Destra: composizione delle bande spettrali 432 (Casagli et al., 2006a).

5.3.1.2 Valutazione del rischio residuo

Dal punto di vista operativo, l'individuazione di eventuali porzioni dell'area di interesse in cui si registrano delle deformazioni residue successive all'evento in esame, può essere eseguita mediante l'analisi della distribuzione del campo di velocità media di deformazione registrato in corrispondenza delle immagini acquisite dopo l'evento stesso. In questo modo, la presenza di elevati tassi di spostamento può costituire un'evidente indicazione della presenza di fenomeni deformativi successivi alla manifestazione principale del fenomeno. I criteri per eseguire l'identificazione delle aree instabili a partire dall'analisi dei *trend* medi di deformazione dei bersagli radar individuati mediante tecniche multi-interferogramma sono illustrati nella sezione 5.1.1.1. Inoltre, per stimare o aggiornare lo stato di attività del fenomeno di interesse mediante l'utilizzo dei risultati di un'analisi multi-interferogramma, si può seguire la procedura descritta all'interno della sezione 5.1.1.2.

Un'analisi più approfondita dei fenomeni di interesse può essere effettuata sfruttando le informazioni di deformazione contenute all'interno delle serie storiche dei bersagli radar, per ottenere indicazioni sul comportamento dei vari punti di misura non direttamente deducibili dal solo valore di velocità media di deformazione annuale e per mettere in luce la presenza di accelerazioni del tasso di spostamento, bruschi movimenti o alterazioni correlabili con la riattivazione del fenomeno deformativo (cfr. 5.2.1.1). In particolare, può essere utile confrontare i *trend* deformativi registrati prima e dopo l'evento attraverso i criteri descritti nella sezione 5.2.1.2, per ricercare eventuali variazioni del campo deformativo legate al dissesto in esame.

Per la valutazione del rischio residuo, oltre alle analisi multi-interferogramma (Fig. 88), è utile eseguire analisi interferometriche differenziali (Fig. 89) tramite le quali possono essere misurati i *trend* deformativi anche in aree parzialmente coperte da vegetazione e/o aree caratterizzate da tassi di deformazione più elevati.

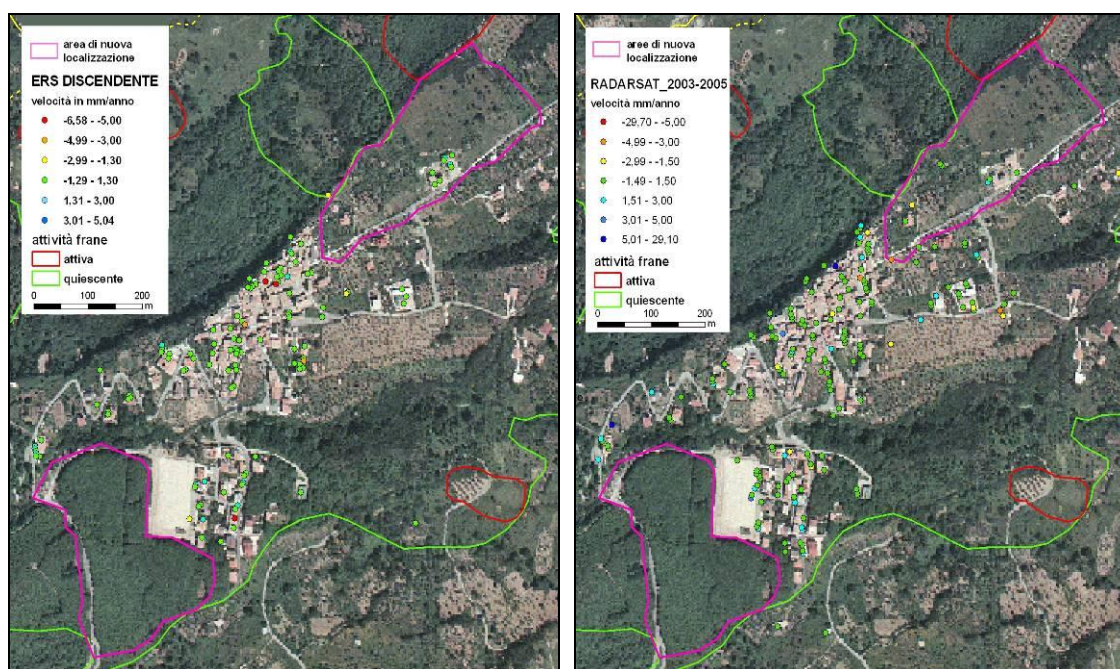


Fig. 88 - Valutazione delle condizioni di stabilità geologica e geomorfologica di due diverse aree per la possibile ri-localizzazione dell'abitato di Cavallerizzo (CS), ubicate nel centro urbano di Cerzeto, presso le località Pianette (in alto) e Amatine (in basso). L'analisi interferometrica satellitare su immagini ERS (sinistra) e RADARSAT (destra) integrata con l'analisi di immagine ottiche ad alta risoluzione, ha permesso di selezionare l'area di Pianette (Casagli et al., 2006a).

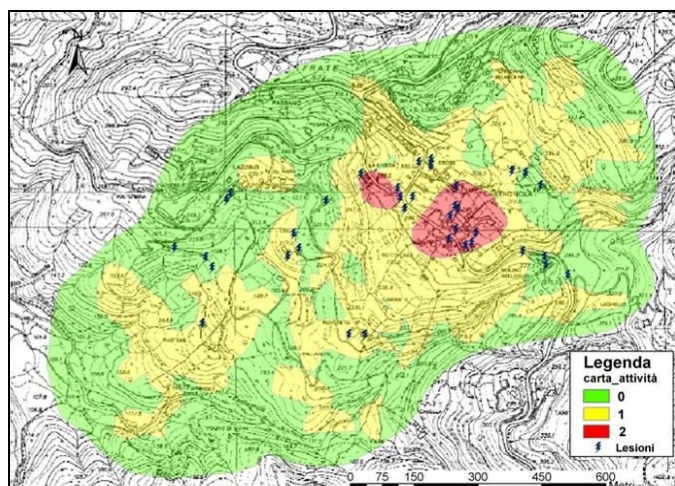


Fig. 89 - Mappa di attività dell'area della frana di Castagnola (SP), realizzata mediante l'analisi in ambiente GIS delle mappe di deformazione multi-temporali ottenute con l'analisi interferometrica differenziale di coppie di immagini ERS appartenenti all'intervallo temporale compreso tra il 1992 e il 2001. Livelli di attività: 0 = minimo, 1 = intermedio, 2 = massimo (Casagli et al., 2004).

5.3.2 Area test: Agrigento (Sicilia)

Al fine di supportare la progettazione degli interventi di protezione civile diretti a fronteggiare i dissesti idrogeologici in atto nell'area urbana di Agrigento, è stata effettuata un'analisi interferometrica satellitare a scala locale, secondo l'approccio di mappatura rapida dei dissesti e valutazione delle condizioni di pericolosità residue (cfr. 5.3.1 e Fig. 83).

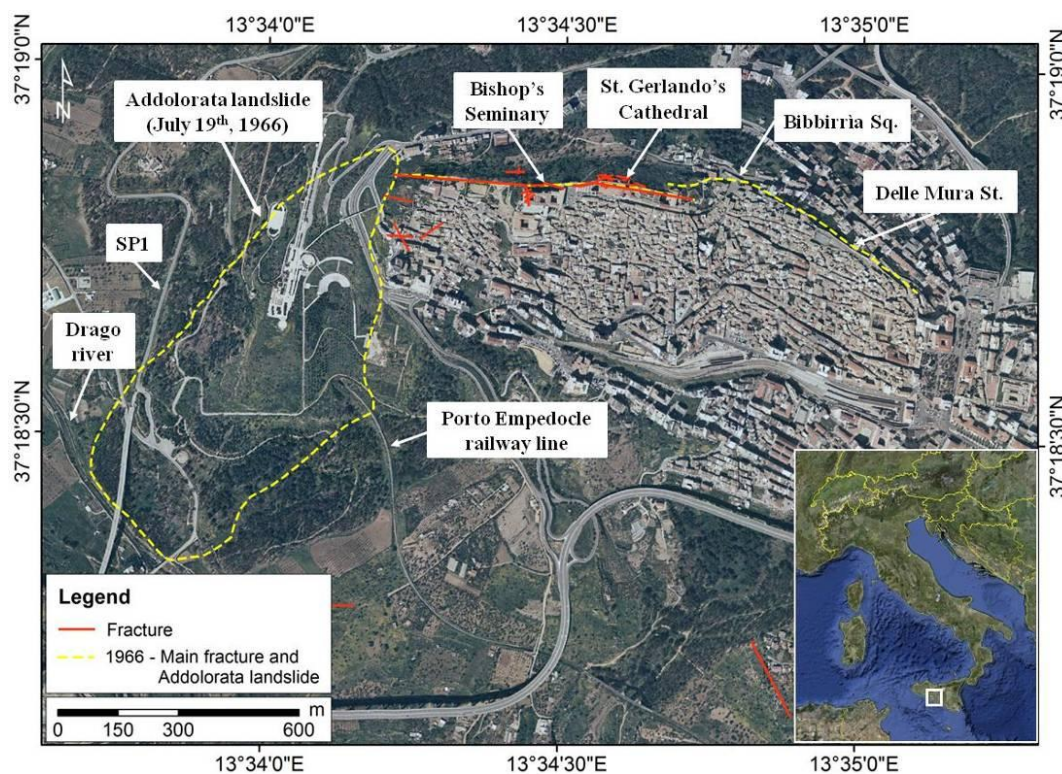


Fig. 90 - Localizzazione del centro abitato di Agrigento (Sicilia), mappatura della frana dell'Addolorata (1966) e distribuzione delle principali fratture e lineazioni presenti all'interno del centro abitato (Cigna et al., submitted; cfr. allegato).

L'intero versante settentrionale del rilievo su cui sorge la città, presenta gravi condizioni di instabilità che determinano importanti situazioni di dissesto che coinvolgono importanti edifici di culto quali il Duomo, il Seminario, la Curia Arcivescovile, la Chiesa di S. Alfonso, la Chiesa dell'Itria e numerose abitazioni private e infrastrutture (Fig. 90). Le caratteristiche dei fenomeni, che risultano oggi ancora attivi e costituiscono una condizione di rischio per la popolazione, hanno condotto all'emanazione dell'Ordinanza del P.C.M. n.3450/2005.

Fin da tempi storici, lo sviluppo della città di Agrigento è stato condizionato dal suo particolare assetto geomorfologico e l'abitato è stato spesso interessato da numerosi dissesti idrogeologici. La franosità che attualmente interessa il versante N ha subito nel passato molteplici riattivazioni documentate e la sua causa sembra essere legata all'alto grado di fratturazione dei banconi calcarenitici e delle sabbie grossolane cementate a comportamento rigido, appartenenti alla Formazione di Agrigento del Pleistocene inferiore, poggianti sui livelli argillosi a comportamento duttile, appartenenti alla Formazione di Monte Narbone del Pliocene medio-superiore (Motta, 1957; Ruggeri & Greco, 1967; Cotecchia et al., 1996; Fiorillo, 1999; Fig. 91).

I sistemi di discontinuità presenti nei banconi a comportamento fragile, controllano e condizionano la stabilità del versante, poiché determinano numerosi fenomeni gravitativi (principalmente crolli e ribaltamenti) e l'arretramento del fronte sommitale, accentuato ed accelerato dai processi di erosione e dai numerosi interventi antropici.

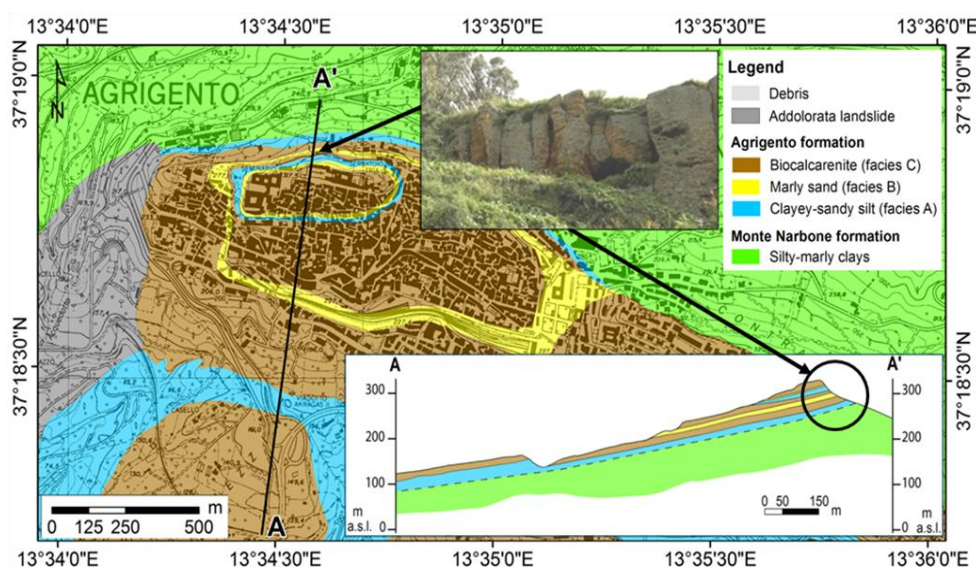


Fig. 91 - Carta geologica e sezione A-A' relative all'area urbana di Agrigento (Cigna et al., submitted; cfr. allegato).

Al fine di quantificare le deformazioni del suolo connesse ai dissesti che interessano il versante N e studiarne l'evoluzione nel tempo, sono stati analizzati i risultati delle indagini interferometriche eseguite mediante la tecnica PSInSAR, messi a disposizione dal DPC nell'ambito del progetto *SAR.net* (dati ERS 1992-2000 e RADARSAT 2003-2007).

I risultati dell'analisi interferometrica satellitare hanno mostrato per tutto l'intervallo temporale 1992-2000 una situazione sostanzialmente stabile per l'intero centro abitato, ad eccezione del versante occidentale, in cui sono stati registrati tassi di deformazione piuttosto elevati, con picchi fino a 10-12 mm/anno (Fig. 92 A). L'area interessata dai movimenti corrisponde alla zona di distacco della frana dell'Addolorata, la cui ultima attività accertata risale al 19 Luglio 1966 (Comm. Min., 1968).

Attualmente l'area in frana presenta delle accentuate instabilità in alcuni settori che sono state determinate, probabilmente, da interventi antropici sul versante. La frana è stata classificata all'interno del P.A.I. (Piano di Assetto Idrogeologico) del 2006 come quiescente, con alcuni settori completamente stabilizzati, ma parte della sua porzione superficiale è soggetta

a fenomeni superficiali di tipo *creep* che si estendono notevolmente in direzione N. Questa condizione di instabilità si manifesta con dissesti che interessano diffusamente le infrastrutture più superficiali e in modo particolare parte delle strutture di servizio del Parco dell'Addolorata e della Strada Provinciale S.P.1.

L'analisi di dettaglio eseguita sulle serie storiche dei PS ERS ubicati in prossimità di tale area, ha mostrato la presenza di alcuni bersagli radar caratterizzati da una velocità di spostamento mantenutasi costante durante tutto l'intervallo temporale 1992-2000 e pari a circa 8 mm/anno in allontanamento dal satellite (Fig. 92 B).

Nel settore NW del centro abitato (Fig. 93 A), in prossimità del Duomo e del Seminario Vescovile, non sono state registrate accelerazioni degli spostamenti nel periodo 1992-2000, ad eccezione del comportamento registrato da un singolo caposaldo ubicato in corrispondenza del Seminario, caratterizzato da una serie storica di deformazione nella quale è presente un brusco movimento di 10-15 mm in allontanamento dal sensore, registrato tra le acquisizioni di Agosto e Settembre 1999 e probabilmente correlabile con problemi strutturali dell'edificio legati ai dissesti in atto nel versante (Fig. 93 B).

Come evidenziato dall'analisi dei dati ERS del periodo 1992-2000, anche nel periodo coperto dalle immagini RADARSAT (2003-2007) il centro abitato di Agrigento risulta nel complesso stabile con valori di velocità medie di deformazione estremamente bassi, ad eccezione della presenza di movimenti localizzati in corrispondenza di alcuni punti isolati con valori di alcuni mm/anno.

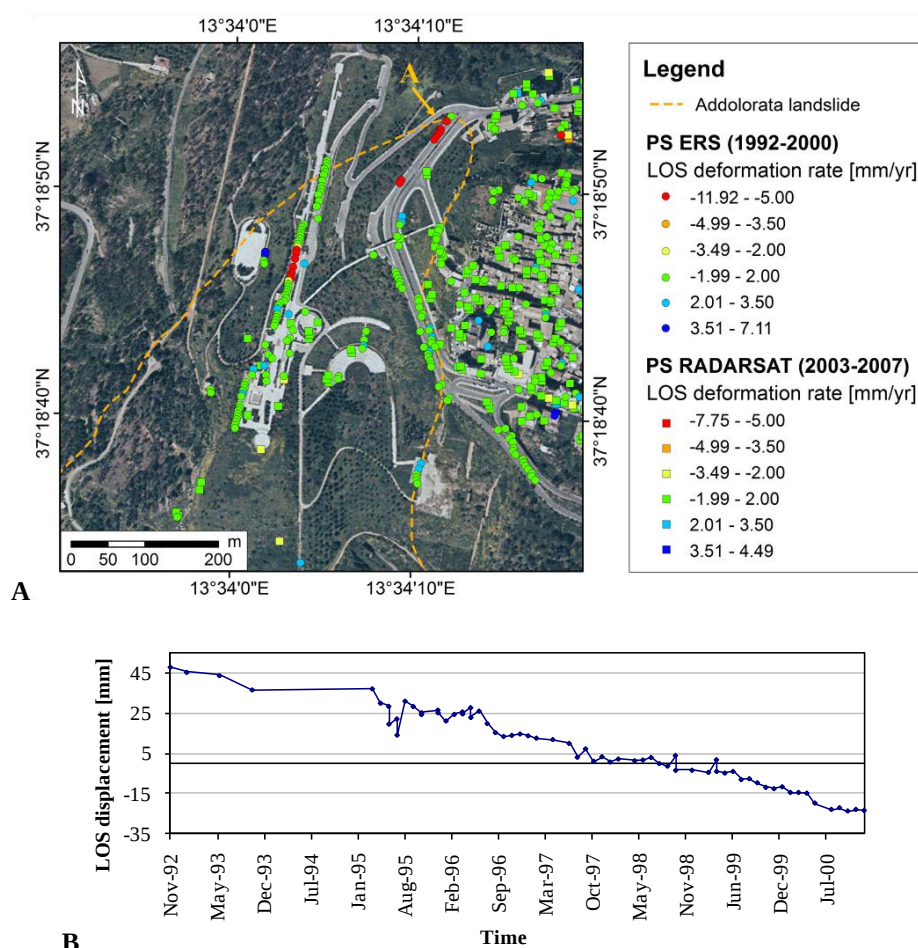


Fig. 92 - A: Distribuzione dei PS ERS (geometria discendente) e RADARSAT (ascendente), classificati in funzione della velocità media nel periodo 1992-2000 e 2003-2007 rispettivamente, in corrispondenza della zona di distacco della frana dell'Addolorata. B: Serie storica media di alcuni PS ERS ubicati in prossimità della zona di distacco (Cigna et al., submitted; cfr. allegato).

I PS ubicati nel settore NW dell'abitato non presentano valori di velocità che indicano movimenti significativi tuttavia, è da segnalare, la presenza di alcuni punti che possiedono un comportamento non stabile (Fig. 93 A). Di tutti i caposaldi la situazione più critica è da attribuire ad un PS ubicato in prossimità della scalinata del Duomo, caratterizzato da velocità media nel periodo 2003-2007, superiore a 2 mm/anno in direzione di allontanamento dal sensore. La sua serie storica registra un'accelerazione degli spostamenti a partire dall'acquisizione di Agosto 2006, mantenutasi costante fino all'ultima immagine disponibile. Tale situazione rappresenta un chiaro segno dello stato di attività dei dissesti che interessano l'area del Duomo e costituisce una condizione cui prestare particolare attenzione perché indica che il caposaldo radar è attualmente in movimento con una velocità significativamente elevata (circa 13 mm/anno) (Fig. 93 C).

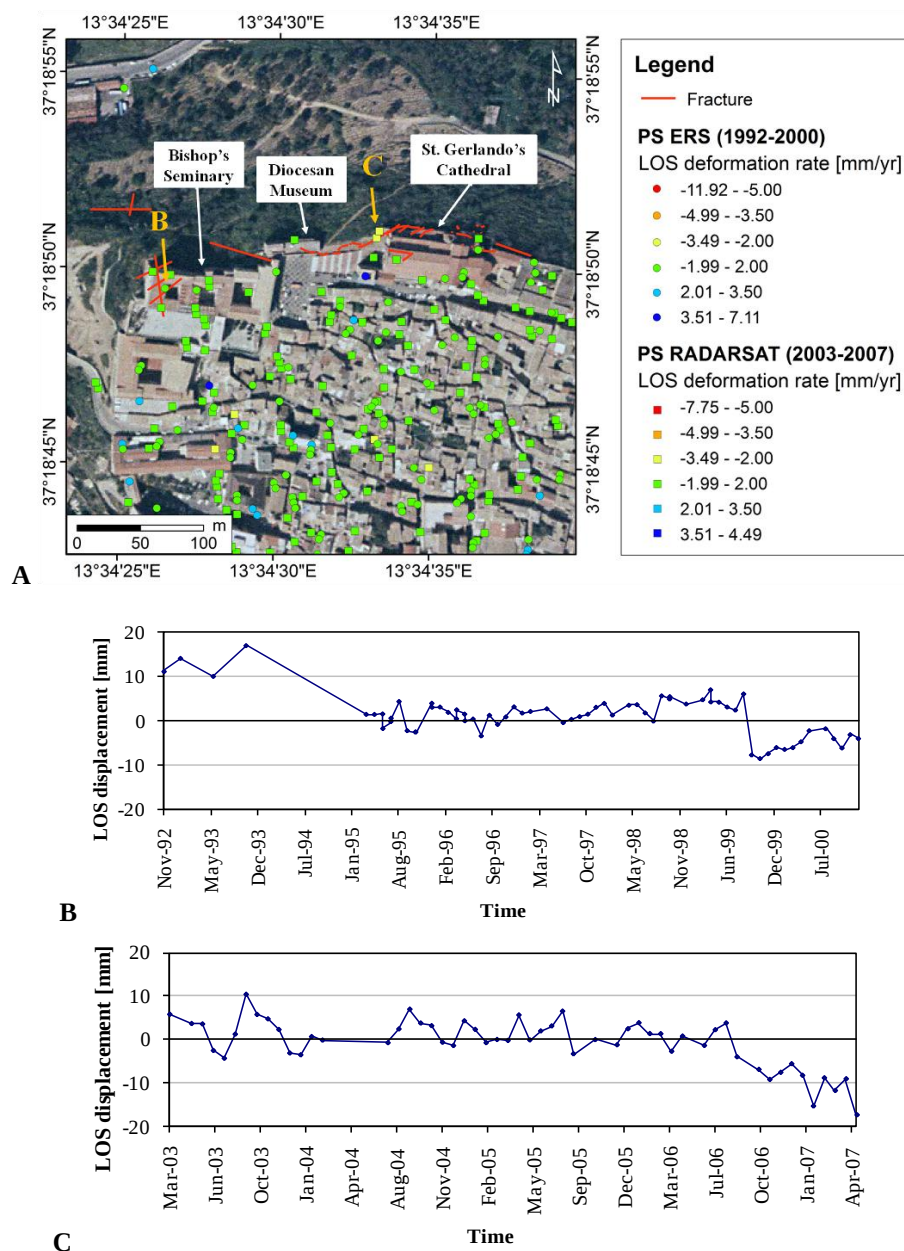


Fig. 93 - A: Distribuzione dei PS ERS 1992-2000 (geometria discendente) e RADARSAT 2003-2007 (ascendente) nel settore NW dell'abitato di Agrigento. B: serie storica di un PS ERS ubicato sul Seminario. C: serie storica di un PS RADARSAT ubicato sulla scalinata della Cattedrale (Cigna et al., submitted; cfr. allegato).

Nonostante i valori di velocità degli altri PS, sia per il periodo 1992-2000 sia per il 2003-2007, indichino l'assenza di movimenti consistenti, non è esclusa la presenza di deformazioni nell'area del versante NW, nella quale è probabile che la direzione principale dei movimenti sia la N-S. Infatti, a causa della geometria di vista del satellite, le misure PS risultano poco sensibili ai movimenti orientati in tale direzione (solo il 5% dello spostamento reale può essere misurato).

Per maggiori approfondimenti riguardanti l'analisi di mappatura rapida e valutazione della pericolosità residua eseguita per il centro abitato di Agrigento si consultino i seguenti lavori scientifici allegati alla presente Tesi di Dottorato:

- **CIGNA F., DEL VENTISETTE C., CASAGLI N., LIGUORI V.** (submitted) - *Combining in situ investigations and satellite InSAR 'back monitoring' for the analysis of present-day ground instability in Agrigento (Sicily, Italy)*. Submitted to Engineering Geology in January 2011.
- **CIGNA F., DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., CASAGLI N.** (2010b) - *InSAR time-series analysis for management and mitigation of geological risk in urban area*. In: Proc. IGARSS2010, Hawaii, USA. pp. 1924-1927.
- **CIGNA F., DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., CASAGLI N.** (2010c) - *Landslide detection and long-term monitoring in urban area by means of advanced interferometric techniques*. EGU General Assembly 2010. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-14368, 2010.
- **CASAGLI N., CIGNA F., DEL CONTE S., LIGUORI V.** (2009a) - *Nuove tecnologie radar per il monitoraggio delle deformazioni superficiali del terreno: casi di studio in Sicilia*. Geologi di Sicilia, Anno XVII, vol.3, 17-27.

5.3.3 Area test: M'dina (Malta)

Allo scopo di supportare la progettazione di un sistema di monitoraggio strutturale e interventi di consolidamento delle mura e del patrimonio dell'antico centro abitato di M'dina (Malta; Fig. 94), è stata effettuata un'analisi radar multi-interferometrica satellitare a scala locale, secondo l'approccio di mappatura rapida dei dissesti e valutazione delle condizioni di pericolosità residue presentato nella sezione 5.3.1 e nella Fig. 83.



Fig. 94 - Localizzazione geografica (Google Earth) e inquadramento di dettaglio dell'abitato di M'dina, con indicazione delle aree maggiormente danneggiate: area A: Vilhena Palace; area B: Cattedrale; area C: Magazzini.

L'abitato di M'dina è soggetto a fenomeni di instabilità di versante a causa del marcato contrasto tra le caratteristiche geotecniche dello strato calcareo rigido e fragile (*Upper Coralline Limestone*) su cui la città è costruita, e la spessa unità deformabile argillosa (*Blue Clay*) sottostante (Fig. 95). I fenomeni di dissesto in atto consistono in meccanismi di ribaltamento e arretramento delle pareti rocciose, erosione della roccia e del substrato e lenti movimenti di versante che danneggiano le strutture perimetrali della città (Casagli et al., 2008c).

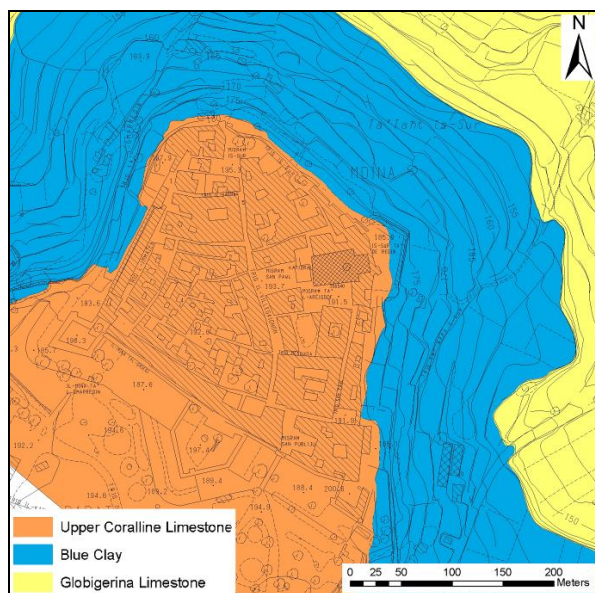


Fig. 95 - Inquadramento geologico di dettaglio dell'abitato di M'dina (Casagli et al., 2008c).

I dati radar satellitari analizzati consistono in 63 immagini ERS (1992-2001) e 29 immagini ENVISAT (2003-2008), acquisite in geometria discendente ed elaborate dalla scrivente per mezzo della tecnica IPTA, descritta all'interno della sezione 2.4.1.

I *point target* (PT) sono stati individuati utilizzando la combinazione dei due criteri di selezione dei bersagli, quello basato sull'analisi temporale dell'ampiezza del segnale e quello basato sull'analisi della coerenza, in modo da ricavare il maggior numero possibile di punti di misura delle deformazioni.

Gli interferogrammi sono stati calcolati utilizzando un'unica immagine *master* per ciascun *data stack* (scena 30/03/1998 per i dati ERS; scena 13/03/2006 per i dati ENVISAT), caratterizzate da una posizione centrale rispetto alle altre immagini, sia dal punto di vista temporale che spaziale, in modo da minimizzare la dispersione dei valori di *baseline* temporale e geometrica. Il *reference point* per ciascuna delle due elaborazioni è stato scelto in una zona stabile e in posizione centrale rispetto all'area analizzata.

Per simulare il termine di fase legato alla topografia si è fatto uso di un DEM SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) con risoluzione di 3 arcosecondi (circa 90 m), distribuito gratuitamente dall'USGS (*United States Geological Survey*).

Grazie ad un processo iterativo, sfruttando il diverso comportamento delle componenti della fase interferometrica nei confronti del tempo, dello spazio e della *baseline* normale, è stato possibile separare i contributi legati alla deformazione lineare e non lineare, quelli legati alla correzione topografica, i termini atmosferici ed il rumore (Fig. 96 and Fig. 97).

Tutte le immagini SAR a disposizione sono state elaborate ed hanno condotto alla creazione di due *dataset* di misure di deformazione, 1992-2000 e 2003-2008 (Fig. 98). È stato ricavato un numero rilevante di bersagli radar sull'intera area analizzata: 10.941 per l'analisi ERS (140 PT/km²) e circa 6.000 per l'analisi ENVISAT (75 PT/km²). L'evidente differenza nel numero di bersagli analizzati nei due diversi periodi è dovuta alla differenza nel numero di immagini costituenti ciascun *data stack*.

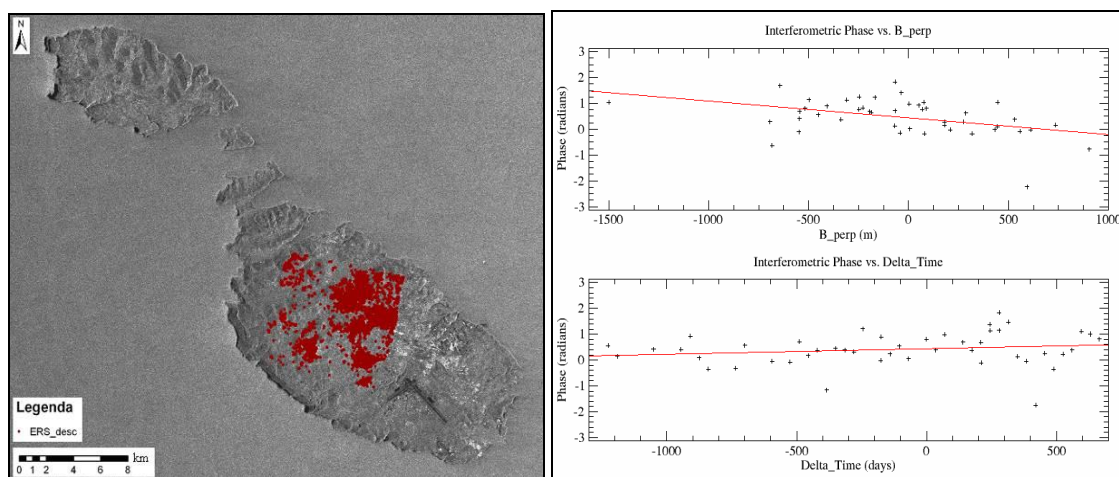


Fig. 96 - Analisi IPTA eseguita su Malta con immagini ERS discendenti del periodo 1992-2001. Sinistra: Ubicazione dei *point target* individuati mediante l'analisi. Destra: Esempio di analisi di regressione 2D di fase interferometria differenziale relativa a due punti vicini.

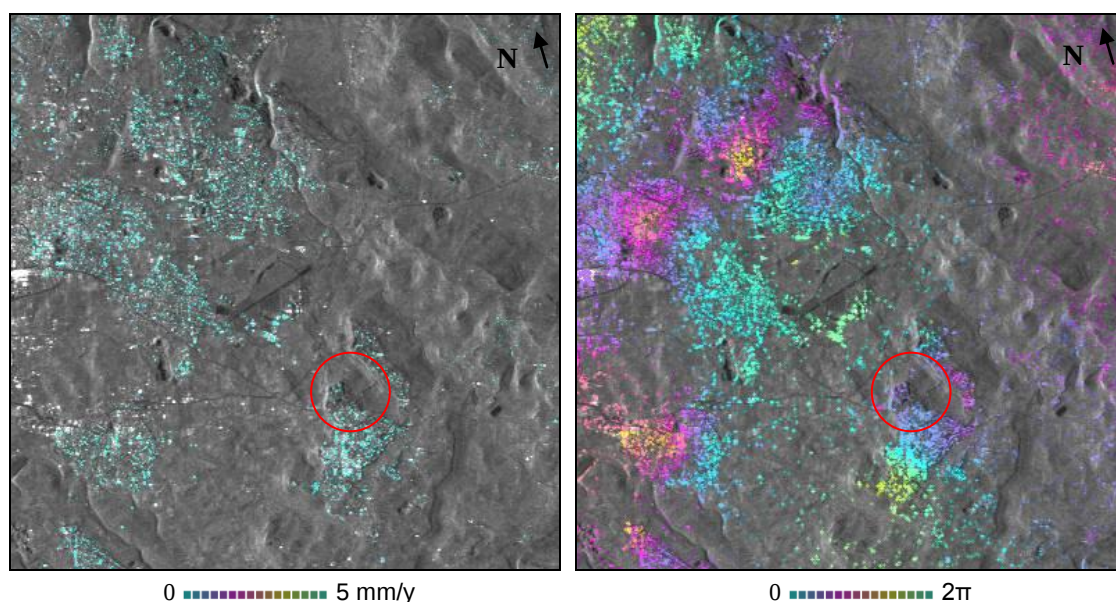


Fig. 97 - Analisi IPTA eseguita su Malta con immagini ERS discendenti del periodo 1992-2001. Sinistra: Velocità medie di deformazione. Destra: Esempio di componente di fase legata alla presenza dell'atmosfera. Entrambe le immagini sono in coordinate SAR. In rosso è indicato l'abitato di M'dina.

In particolare, grazie all'analisi ERS, all'interno della città di M'dina sono stati individuati 23 *point target* (Fig. 98), tutti caratterizzati da velocità media di deformazione piuttosto contenuta e da serie storiche che hanno messo in luce una situazione di generale stabilità dal 1992 al 2000. La distribuzione spaziale di tali bersagli tuttavia si è rivelata non omogenea sul centro abitato, specialmente nelle aree maggiormente danneggiate (aree A, B e C; Fig. 94).

I risultati dell'analisi mostrano anche per l'intervallo 2003-2008 una situazione generalmente stabile, ad eccezione di alcuni bersagli caratterizzati da velocità piuttosto consistenti e ubicati nelle aree maggiormente danneggiate (Fig. 98). Le serie storiche di tali punti sono mostrate in Fig. 99.

La serie storica del PT 26430 ubicato nell'area dei magazzini (area C) rivela la presenza di alcuni errori in fase di elaborazione, legati all'equivocazione della fase interferometria ed alla conseguente significativa sottostima delle reali deformazioni avvenute nel 2003-2008 (Fig. 99).

c). In tal caso, benché la velocità media annuale del PT sembri piuttosto bassa e caratterizzata da segno positivo (in avvicinamento al satellite), è ragionevole assumere che si siano verificati dei movimenti maggiori di 14 mm (tra un'acquisizione e la successiva) e che questi siano stati equivocati (errore di $\pm 2\pi$, cioè ± 28 mm), come visibile tra l'acquisizione del 17/05/2004 e quella del 26/07/2004 (Fig. 100). Sotto questa ipotesi, tale bersaglio indicherebbe una velocità di deformazione di circa 25-35 mm/anno in allontanamento dal sensore (negativi).

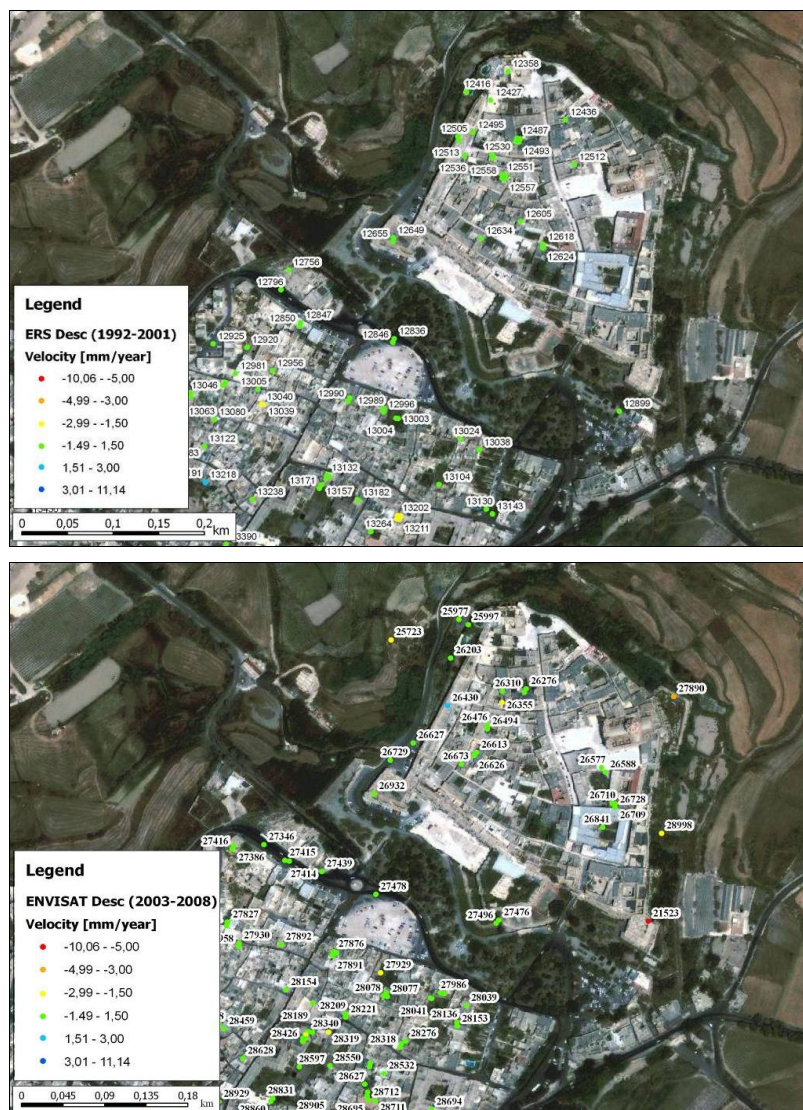


Fig. 98 - Risultati dell'analisi IPTA effettuata nell'area di Mdina (Malta) mediante immagini ERS 1992-2001 (sopra) ed ENVISAT 2003-2008 (sotto) acquisite lungo orbite discendenti. I *point target* sono visualizzati in base alla velocità di deformazione media registrata all'interno del periodo coperto dalle immagini radar.

Purtroppo, a causa della geometria di vista del sensore in configurazione discendente e, in conseguenza degli elevati tassi di deformazione caratteristici dei fenomeni in atto nell'area in studio, i risultati delle analisi IPTA non hanno condotto a conclusioni ulteriori rispetto a quelle dedotte dai rilievi e dalle misure *in situ* condotte dal gruppo di lavoro del DST-UNIFI nel 2008. Infatti, il confronto tra l'orientazione della LOS del satellite e la direzione di deformazione prevalente in alcune zone del centro abitato, rilevata durante alcuni sopralluoghi, ha mostrato che la percentuale di deformazione leggibile dal satellite è molto ridotta in corrispondenza delle strutture più lesionate di M'dina (38%). Tuttavia, ciò giustifica solo in parte la registrazione sui *point target* di deformazioni piuttosto basse o addirittura l'assenza di dati.

Considerando inoltre la morfologia dell'area indagata e la presenza di poche strutture urbane riflettenti e/o limitate combinazioni geometriche delle stesse adatte alla creazione di diedri e triedri riflettenti il segnale radar verso il sensore, nonché la presenza di diverse zone in ombra e in *layover* (cfr. 2.1.1), la bassa densità di bersagli e le basse velocità di deformazione registrate possono essere del tutto giustificate.

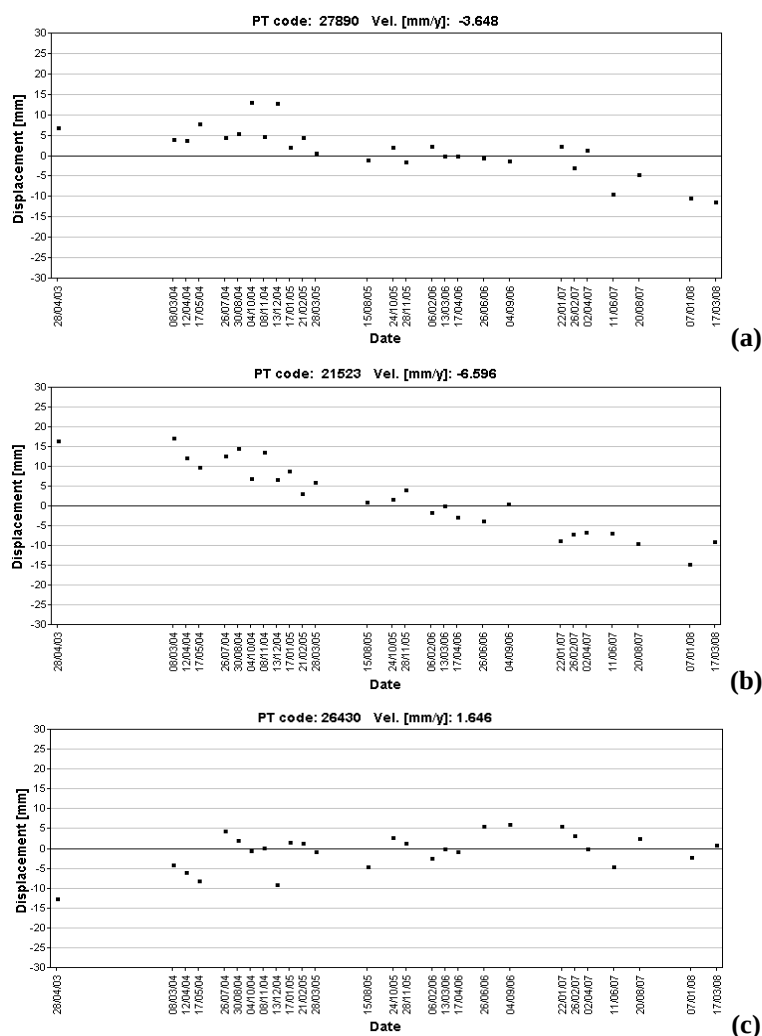


Fig. 99 - Esempi di serie storiche di deformazione di PT ENVISAT 2003-2008.

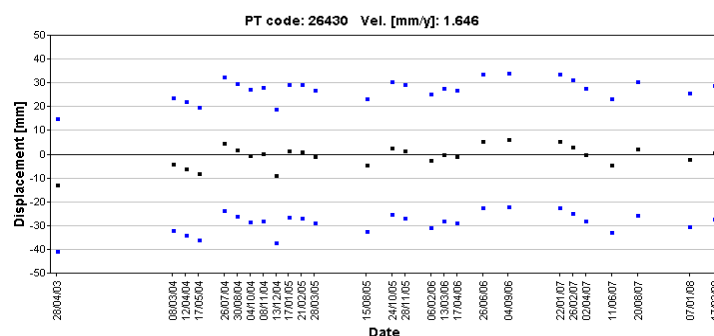


Fig. 100 - Serie storica del PT 26430, con indicati i dati di spostamento misurati e le repliche (positiva e negativa; ± 28 mm).

5.4 Monitoraggio e sorveglianza dei fenomeni di dissesto

Il monitoraggio e la sorveglianza consistono nel controllo dei fenomeni di dissesto idrogeologico, nell'individuazione di zone e soglie di allerta e nella formulazione e/o conferma dei livelli e scenari di criticità.

Le autorità di protezione civile coinvolte nella gestione delle crisi, soprattutto nel caso in cui i fenomeni di dissesto insistano su aree abitate o su elementi ad alto valore socio-economico, richiedono efficaci sistemi di sorveglianza per predire l'evoluzione del fenomeno atteso o già in atto e di conseguenza predisporre le azioni necessarie a contenerne gli effetti.

La sorveglianza si esplica tramite la raccolta dei dati rilevati dai diversi sensori nonché tramite le notizie non strumentali reperite localmente e la loro successiva trasmissione e concentrazione nelle sale operative delle autorità di protezione civile. Tali attività sono finalizzate alla raccolta delle informazioni che consentano sia di formulare o confermare gli scenari previsti, sia di aggiornarli a seguito dell'evoluzione dei fenomeni in atto. L'attività di sorveglianza include dunque le azioni di monitoraggio in tempo reale necessarie per la determinazione dei livelli di criticità legati al possibile verificarsi di scenari di evento potenzialmente distruttivi.

Le situazioni di criticità normalmente sono articolate su più livelli, un livello di base relativo alla situazione ordinaria, in cui le criticità sono ritenute comunemente accettabili per la popolazione, e altri livelli (da criticità moderata fino a elevata), atti a predisporre le adeguate azioni di contenimento degli effetti dell'evento. Una volta raggiunte o superate le soglie predefinite degli indicatori tenuti sotto controllo (identificate nelle fasi conoscitive sulla base delle informazioni storiche o derivanti dalla modellistica), devono essere attivati i sistemi di contrasto preventivo degli eventi e dei loro effetti, in preparazione all'emergenza.

Da questo punto di vista, appare fondamentale la disponibilità di efficienti sistemi di monitoraggio capaci di rilevare, sia a scala di versante sia a scala di bacino, i più importanti parametri connessi con il verificarsi degli eventi, preliminarmente identificati nelle fasi di previsione e prevenzione, indicativi e rappresentativi dell'evoluzione nel tempo e nello spazio dell'evento calamitoso e dei suoi effetti.

Tali parametri possono riguardare sia i fattori innescanti dei fenomeni, quali le piogge o i terremoti nel caso delle frane, sia gli effetti degli stessi e quindi l'attivazione dei movimenti.

A questo proposito è importante il contributo che può essere fornito, sia a larga scala sia a scala locale, da un efficace sistema di sorveglianza e un'adeguata strumentazione di controllo delle deformazioni superficiali, quali parametri indicatori dell'evoluzione temporale dei fenomeni di dissesto. Infatti, tra tutti i parametri misurabili connessi con i movimenti di versante, gli spostamenti superficiali rappresentano spesso quello più immediato da monitorare per capire quale sarà l'evoluzione dei fenomeni, soprattutto di quelli che evolvono a scala locale.

La strumentazione convenzionale geodetica e geotecnica impiegata normalmente per il monitoraggio delle deformazioni superficiali, come le stazioni totali, le reti GPS e gli estensimetri, non risponde molto bene ai requisiti di un monitoraggio in tempo reale durante una crisi. Infatti, questi strumenti permettono di misurare soltanto gli spostamenti di alcuni punti, necessitano l'accesso all'area instabile per l'installazione e difficilmente riescono a fornire misure con un'elevata frequenza di campionamento.

Le tecniche interferometriche satellitari possono da questo punto di vista superare le metodologie di monitoraggio convenzionali, grazie alle caratteristiche di copertura areale, alla continuità temporale e alla multi-temporalità delle riprese, alla possibilità di ricavare misure di deformazione accurate in modo non invasivo, senza entrare in contatto diretto con il luogo indagato e conseguentemente potendo controllare luoghi caratterizzati da scarsa accessibilità. L'uso di queste tecniche è fondamentale per l'individuazione dello stato di attività dei dissesti, lo studio della loro evoluzione nel tempo, la valutazione della loro estensione areale, la zonizzazione del territorio in base alla pericolosità e al rischio idrogeologico.

I contributi che l'analisi interferometrica satellitare può apportare nei confronti del monitoraggio e della sorveglianza dei fenomeni di dissesto idrogeologico e nella determinazione delle zone e soglie di allerta, sono i seguenti:

- controllo delle deformazioni superficiali sia a **larga scala** sia a **scala locale**;
- valutazione delle deformazioni in corrispondenza di **numerosi punti di misura**;
- monitoraggio **remoto** delle deformazioni superficiali, in modo **non invasivo**, senza entrare in contatto diretto con l'area a rischio e con la possibilità di controllo di **aree caratterizzate da scarsa accessibilità**;
- **elevata frequenza** di controllo sull'area di interesse;
- possibilità di controllo in qualunque condizione, sia di giorno che di notte e in presenza di coperture nuvolose o nebbia;
- definizione dello **stato di attività** dei fenomeni;
- identificazione di **movimenti precursori**;
- definizione di **scenari evolutivi** dei fenomeni che insistono su aree a rischio;
- individuazione di **zone e soglie di allerta**.

5.4.1 Metodologia

La sorveglianza dei fenomeni di dissesto idrogeologico mediante tecniche radar satellitari, in relazione alle frequenze di acquisizione dei sensori oggi disponibili (cfr. 2.2) e alla continuità temporale e multi-temporalità delle riprese, riesce a rientrare nel campo del tempo reale (così come definito dalla Dir. P.C.M. del 27/02/2004). Tuttavia, la sua applicazione è notevolmente condizionata dai tempi di consegna ed elaborazione delle immagini radar e dai criteri scelti per la post-elaborazione delle misure.

L'operatività delle nuove missioni spaziali e, in particolare della costellazione di satelliti italiani COSMO-SkyMed (cfr. 2.2.3), permette inoltre di ottenere una frequenza di acquisizione su uno stesso sito molto più elevata e consente di effettuare un controllo più efficace delle deformazioni che si sviluppano sull'area di interesse, la rapida individuazione dei precursori di eventi deformativi e la conseguente segnalazione delle criticità. Anche per quanto riguarda la scala spaziale, le tecniche interferometriche risultano adeguate per lo sviluppo di un sistema di sorveglianza satellitare a scala nazionale, grazie alla caratteristica di elevata copertura areale delle misure.

Fino ad oggi le tecniche satellitari multi-interferogramma non sono mai state applicate in modo operativo per il monitoraggio e sorveglianza in tempo reale di fenomeni di dissesto, né a scala locale né a scala nazionale, pur possedendo a tale scopo notevoli e adeguate potenzialità.

A questo proposito, si sta progettando e perfezionando una metodologia basata sull'osservazione delle deformazioni superficiali quali indicatori delle condizioni di stabilità dei dissesti geologici, ideata e strutturata grazie alle esperienze maturate dal UNIFI-DST nell'ambito dei diversi progetti nazionali e internazionali inerenti le tematiche di protezione civile.

L'approccio metodologico per il monitoraggio e la sorveglianza satellitare, schematizzato all'interno delle Fig. 101 e Fig. 102, è composto dalle attività di:

- Progettazione del sistema satellitare di monitoraggio e allertamento
- Sviluppo di modelli di segnalazione di serie storiche 'anomale'

Ciascuna delle suddette attività è descritta e discussa all'interno delle sezioni seguenti.

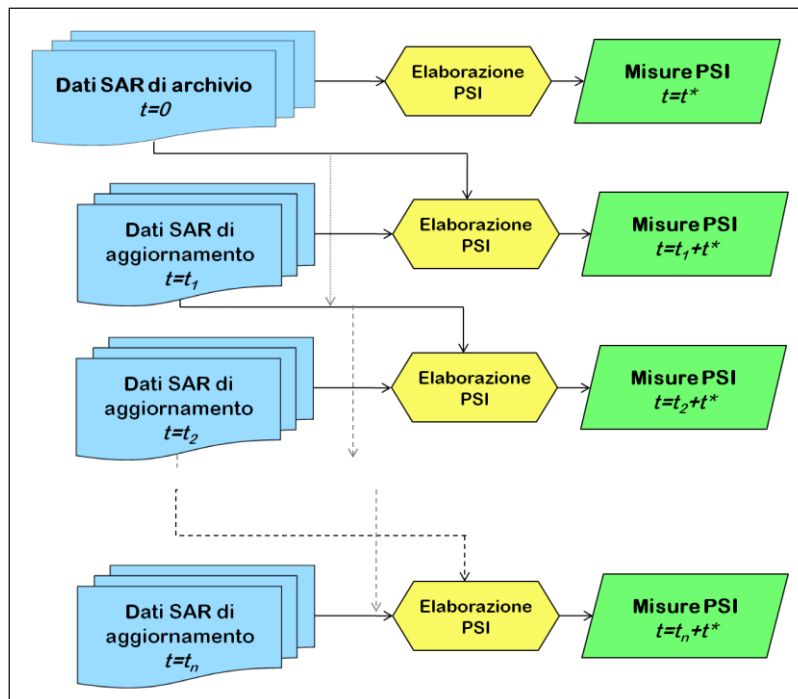


Fig. 101 - Principio di funzionamento dell'aggiornamento delle misure PSI a scopi di monitoraggio e sorveglianza satellitare dei dissesti.

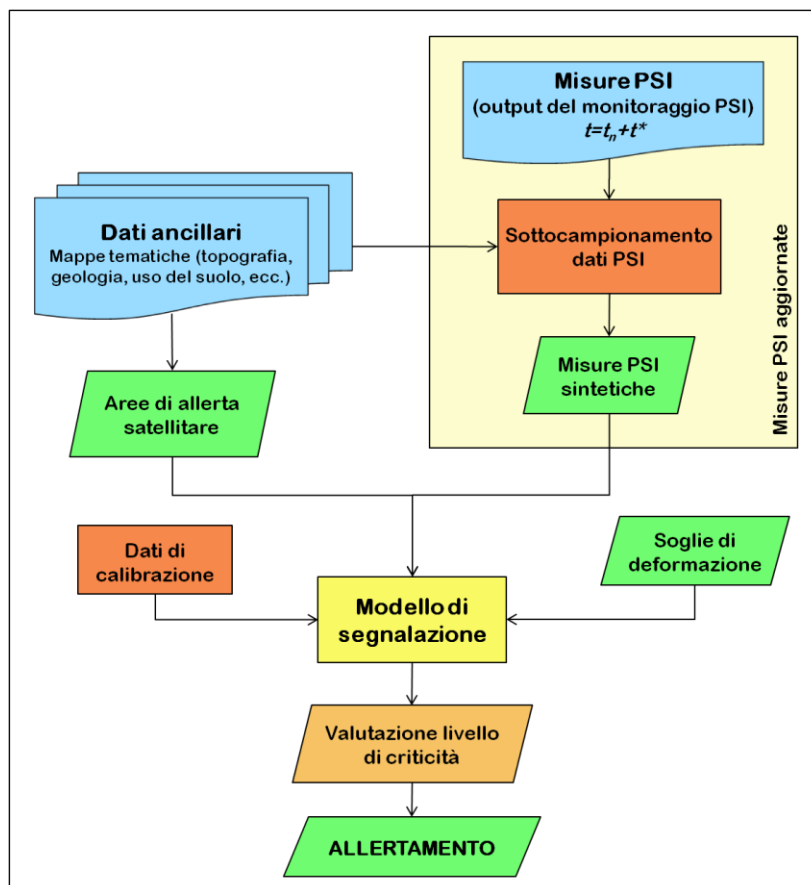


Fig. 102 - Principio di funzionamento della metodologia di radar-interpretazione per il monitoraggio e la sorveglianza satellitare dei dissesti.

5.4.1.1 Progettazione del sistema satellitare di monitoraggio e allertamento

Il sistema satellitare di monitoraggio e allertamento può essere articolato in due livelli successivi:

- **Primo livello:** sorveglianza di massima e continua di tutto il territorio nazionale, finalizzata alla segnalazione automatica di accelerazioni significative dei fenomeni deformativi;
- **Secondo livello:** sorveglianza di dettaglio, attivata sulla base della segnalazione di primo livello, finalizzata all'analisi di aree 'hotspot' ed alla valutazione del livello di criticità legato ai singoli fenomeni di dissesto.

La creazione e la calibrazione di un sistema di monitoraggio satellitare, sia di primo sia di secondo livello, è composta da due momenti fondamentali:

- **Fase preliminare:** consiste nell'analisi di tutti i dati disponibili per l'area di interesse, nella prima elaborazione dei dati radar satellitari, nella definizione delle zone di allerta satellitare e nella taratura del modello di segnalazione e delle soglie di allerta.
- **Fase operativa:** consiste nelle attività di monitoraggio in tempo reale dei fenomeni di interesse e comprende i successivi aggiornamenti dell'analisi interferometrica sull'area di interesse, la ricerca di eventuali movimenti precursori di eventi deformativi e la determinazione dei livelli di criticità (Fig. 101 e Fig. 102).

Fase preliminare

La fase preliminare del sistema satellitare di monitoraggio e allertamento consiste nella raccolta e nell'analisi di tutti i dati disponibili per l'area di interesse, comprende la prima elaborazione dei dati radar satellitari disponibili e si articola nelle seguenti attività:

- definizione delle zone di allerta satellitare: all'interno del territorio nazionale devono essere identificate e delimitate le diverse zone di allerta satellitare (Fig. 102), sulla base di:
 - o caratteristiche e vincoli geologici e geomorfologici;
 - o diverse tipologie di dissesto presenti;
 - o geometria dei *dataset* interferometrici e distribuzione dei *track* e *frame* (cfr. 2.1.2).

All'interno di ciascuna zona di allerta satellitare, in base alla tipologia di fenomeno deformativo atteso, verranno successivamente definiti i criteri di segnalazione della criticità e le relative soglie di allerta.

La definizione delle zone di allerta satellitare è necessaria soltanto all'interno del primo livello di analisi del sistema satellitare di allerta nazionale, poiché le aree analizzate nel secondo livello coincidono con le zone critiche segnalate con l'analisi di primo livello.

- determinazione del modello di segnalazione: una volta definite le zone di allerta satellitare, devono essere identificate le grandezze, e i relativi valori, che possono essere considerati indicatori del manifestarsi dei fenomeni di dissesto idrogeologico.

Come è stato discusso, gli indicatori scelti per il monitoraggio di tali fenomeni, possono far parte dei fattori innescanti o predisponenti oppure possono coincidere con gli effetti stessi degli eventi e, di conseguenza, tradursi nello sviluppo delle deformazioni legate alla manifestazione del dissesto.

La metodologia proposta prevede l'uso delle deformazioni superficiali quali indicatori delle condizioni di stabilità dei dissesti idrogeologici. L'obiettivo specifico della determinazione del modello di segnalazione consiste dunque nella ricerca dei criteri di individuazione di situazioni di rischio legate allo sviluppo di deformazioni superficiali. Ipotizzando di disporre di misure di deformazione multi-interferometriche periodicamente aggiornate, la ricerca consiste nella scelta di un algoritmo per l'analisi delle serie storiche dei bersagli radar identificati sull'area di interesse, capace di individuare accelerazioni dei tassi di spostamento o variazioni del *trend* deformativo dei bersagli legato allo sviluppo di moti precursori.

Nell'ambito del progetto SAR.net e con la collaborazione di TRE, è stata condotta una ricerca finalizzata allo sviluppo di uno strumento di analisi rapida e automatica delle serie storiche di deformazione, capace di individuare alterazioni o anomalie di comportamento dei bersagli radar, correlabili con l'attivazione, l'accelerazione o la presenza di fenomeni deformativi. I risultati preliminari di tale sperimentazione sono descritti e discussi nella sezione seguente.

- taratura del modello di segnalazione e determinazione delle soglie di allerta: una volta scelta la metodologia di segnalazione più appropriata in relazione alle caratteristiche dei fenomeni che caratterizzano l'area di interesse, si procede con la taratura del modello e con la determinazione delle soglie di allerta (Fig. 102).

Le soglie di allerta che attivano una situazione di rischio, vengono determinate grazie alla taratura del modello di segnalazione prescelto. Questa operazione viene effettuata sfruttando tutte le informazioni disponibili sull'area di interesse e correlabili con l'occorrenza dei fenomeni di dissesto, quali:

- conoscenza storica del manifestarsi ed evolversi nel tempo e sul territorio di eventi significativi e dei relativi effetti;
- modellazioni degli eventi e dei loro effetti più probabili.

In fase operativa, il superamento delle soglie di allerta satellitare attiva la fase di allertamento e la valutazione dei diversi livelli di criticità (livello ordinario, livello di moderata criticità, livello di elevata criticità).

In relazione ai due diversi livelli del sistema satellitare di allerta nazionale, tale fase conduce alla determinazione di soglie di allerta satellitare non necessariamente uguali per l'analisi di primo e secondo livello.

Tale scelta è legata sia alle differenze delle caratteristiche dei dati in entrata al modello di segnalazione, sia al diverso grado di approfondimento richiesto dai due livelli di analisi. Infatti, all'interno del secondo livello di analisi, si fornisce un maggiore dettaglio ed è quindi richiesta l'identificazione anche di andamenti anomali meno significativi, probabilmente sottostimati alla scala nazionale.

Per questi motivi, nell'analisi di primo livello, una volta calcolati gli indici e i parametri di anomalia di ogni bersaglio radar, per ogni zona di allerta satellitare può essere ricavato e soglia un unico valore di anomalia caratteristico e rappresentativo della zona (funzione della distribuzione dei valori registrati in corrispondenza dei bersagli contenuti al suo interno).

Nell'ambito del secondo livello invece, essendo necessario un approfondimento e un dettaglio di analisi maggiore rispetto al primo livello, la scelta dei parametri e indici su cui applicare le soglie, ricade direttamente alla scala del bersaglio.

Fase operativa

La fase operativa del monitoraggio e sorveglianza in tempo reale dei fenomeni di interesse comprende (Fig. 103):

- aggiornamento dell'analisi interferometrica: questa fase consiste nell'aggiornamento del *dataset* radar satellitari con l'acquisizione delle nuove immagini disponibili sull'area di interesse e nella ri-elaborazione del *dataset* radar satellitare aggiornato mediante la tecnica multi-interferometrica prescelta nella fase preliminare (Fig. 101).

La frequenza di aggiornamento delle misure satellitari è strettamente connessa ai tempi di rivisitazione dei satelliti sullo stesso sito (cfr. 2.2) e, per i sensori attualmente operativi, è dell'ordine del mese o della settimana.

In situazioni di crisi sarebbe opportuno attuare strategie di aggiornamento del dato con frequenza pari a quella di acquisizione del sensore utilizzato. Tuttavia, le esperienze condotte sulle aree test del progetto SAR.net e le sperimentazioni eseguite sui modelli di segnalazione, hanno mostrato che, a causa della generale rumorosità delle misure di deformazione contenute all'interno delle serie storiche dei bersagli radar, l'adozione di un

intervallo di aggiornamento più ampio permette di ricavare un risultato più affidabile e robusto rispetto a quello ottenibile aggiornando l'analisi con una singola nuova acquisizione. Per tale ragione, la strategia scelta per la realizzazione del sistema satellitare di allerta nazionale risulta quella di eseguire aggiornamenti delle elaborazioni con ampiezza dell'intervallo di aggiornamento delle misure pari a 6-8 acquisizioni (con le frequenze di acquisizione dei satelliti ENVISAT e RADARSAT tale ampiezza corrisponde a 4-6 mesi; per TerraSAR-X e COSMO-SkyMed è di circa 1-2 mesi).

I tempi richiesti dall'aggiornamento dell'analisi interferometrica sono legati sia ai tempi di consegna fisica del nuovo dato, connessi alle modalità richieste dall'utente, sia ai tempi di ri-elaborazione del *dataset* radar satellitare aggiornato.

- applicazione del modello di segnalazione e determinazione dei livelli di criticità: questa fase consiste nell'applicazione del modello di segnalazione delle aree a rischio sui risultati dell'aggiornamento dell'analisi multi-interferometrica (Fig. 102).

L'algoritmo di segnalazione scelto e tarato in fase preliminare, viene implementato sugli aggiornamenti progressivi dell'elaborazione di dati radar satellitari, permettendo di individuare alterazioni o anomalie di comportamento dei bersagli radar correlabili con l'attivazione, l'accelerazione o la presenza di fenomeni deformativi.

Se nell'intervallo di tempo intercorso tra un'analisi e il successivo aggiornamento si sono verificate variazioni dei *trend* deformativi o fenomeni di accelerazione dei fenomeni nell'area di interesse, il modello provvede a segnalarle.

L'eventuale individuazione di situazioni di criticità deve necessariamente essere seguita dall'allertamento da parte delle competenti autorità di protezione civile, da urgenti controlli di campagna finalizzati alla verifica dello stato di attività delle aree segnalate, dall'attivazione di un servizio di sorveglianza locale con strumentazione *in situ* e dall'attuazione di urgenti interventi di mitigazione del rischio.

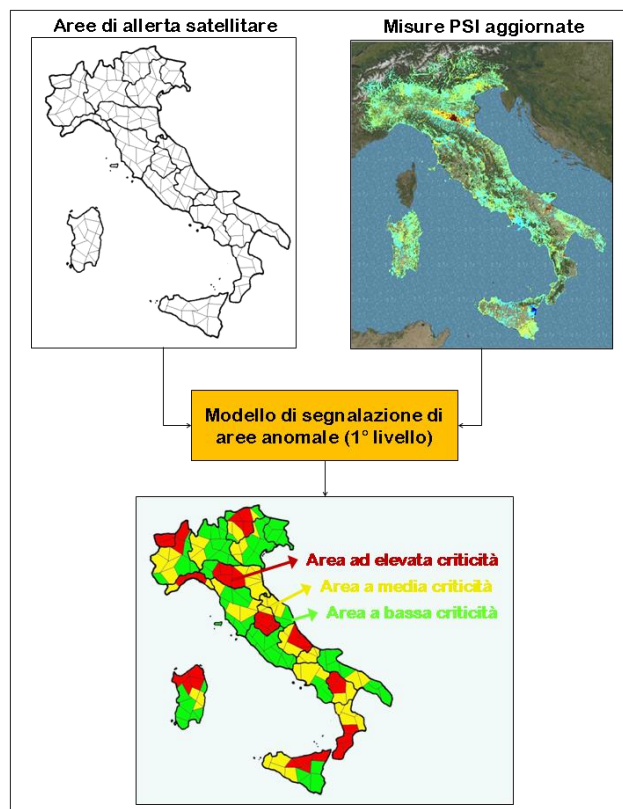


Fig. 103 - Principio di funzionamento del modello di segnalazione di aree anomale a scala nazionale (1° livello).

L'individuazione delle aree critiche di primo livello, viene implementata sulla base di un'analisi rapida e automatica delle serie storiche di deformazione dei bersagli radar ricadenti all'interno delle diverse zone di allerta satellitare. Soltanto all'interno delle aree critiche di primo livello, può essere quindi attivata l'analisi di livello successivo, ovvero la ricerca di dettaglio delle aree critiche di secondo livello, attraverso una procedura finalizzata alla delimitazione e alla valutazione, in tempi rapidi e a scala locale, dell'evento deformativo anomalo.

Il dato di partenza per implementare l'analisi è lo stesso in entrambe le procedure, di primo e di secondo livello. Tuttavia, nella procedura di secondo livello, contrariamente a quella di primo livello, non è prevista la fase di sottocampionatura dei bersagli radar su griglia regolare.

Alla scala della singola zona di allerta satellitare non si ritiene infatti opportuno effettuare una mediazione spaziale grossolana a priori prima dell'analisi temporale del dato. L'analisi spaziale del dato è concentrata esclusivamente nelle ultime fasi.

Le soglie di allerta satellitare per l'analisi di secondo livello non sono necessariamente le stesse di quelle di primo livello, sia perché l'analisi è condotta su serie storiche *raw*, più rumorose rispetto a quelle sintetizzate, sia perché l'analisi di secondo livello richiede un approfondimento maggiore e quindi una vagliatura anche di andamenti anomali meno significativi, alla ricerca di andamenti anomali sottostimati alla scala nazionale.

Le esperienze fino ad ora raggiunte hanno messo in luce la necessità dell'uso congiunto di analisi di tipo temporale sulle serie storiche, e analisi di tipo spaziale, finalizzate al raggruppamento dei bersagli radar in *cluster* omogenei, e alla successiva segnalazione delle aree a rischio. Per tale ragione, all'interno del secondo livello di analisi, successivamente alla fase di segnalazione dei bersagli radar che presentano *trend* anomali, segue la fase di analisi spaziale del dato (*clustering*), finalizzata all'eliminazione di tutti i bersagli anomali selezionati legati ad anomalia fortemente puntuale, ovvero non connessi a un movimento di massa localizzato.

Durante tale fase vengono analizzati non solo la distribuzione spaziale dei bersagli anomali e l'intensità e il gradiente dell'anomalia, ma anche le caratteristiche geologiche e geomorfologiche del territorio in esame, in modo da agevolare la successiva fase di delimitazione dell'area a rischio e l'attivazione dei diversi livelli di criticità (livello ordinario, livello di moderata criticità, livello di elevata criticità) e i conseguenti livelli di allerta.

5.4.1.2 Sviluppo di modelli di segnalazione di serie storiche 'anomale'

La determinazione del modello di segnalazione consiste nella ricerca dei criteri di individuazione di situazioni di rischio legate allo sviluppo di deformazioni superficiali e nella creazione, sperimentazione e miglioramento di un algoritmo capace di selezionare i bersagli radar che cambiano comportamento da un'analisi multi-interferometrica iniziale al successivo aggiornamento (Fig. 104).

Il funzionamento generale dello strumento cercato è il seguente:

- Vengono evidenziate le caratteristiche del *trend* deformativo del punto in esame prima di eseguire l'aggiornamento e si assume che questo rimanga inalterato durante le acquisizioni successive.
- Una volta eseguito l'aggiornamento dell'analisi, si confronta l'andamento previsto mediante i dati pregressi con quello ricavato dall'analisi aggiornata. Il *trend* del bersaglio è 'anomalo' se, nell'intervallo di aggiornamento esso differisce significativamente dalla previsione.

In relazione allo scopo della ricerca, ovvero l'ideazione di un sistema di sorveglianza satellitare a scala nazionale, l'algoritmo cercato può essere applicato direttamente alle serie storiche di deformazione in uscita dall'elaborazione (di seguito denominate *raw*) o, in alternativa, su serie storiche sintetiche create sotto-campionando i bersagli *raw* secondo una griglia regolare.

Le serie storiche di deformazione PSI, sono ricavate mediante l'elaborazione di *stack* temporali di immagini SAR, assumendo a priori un modello di deformazione ben preciso per la discriminazione delle componenti di fase interferometrica legate alle deformazioni (cfr. 2.4). Tale modello è generalmente di tipo lineare e, tutti i contributi di fase che si comportano in modo non

lineare nel tempo, vengono attribuiti a contributi di fase diversi da quelli di deformazione, come ad esempio le componenti atmosferiche. Ciononostante, se le deviazioni dal modello di deformazione sono contenute rispetto al modello stesso, è possibile individuare e discriminare delle alterazioni e/o accelerazioni durante il periodo di monitoraggio (Cigna et al., under review; cfr. allegato).

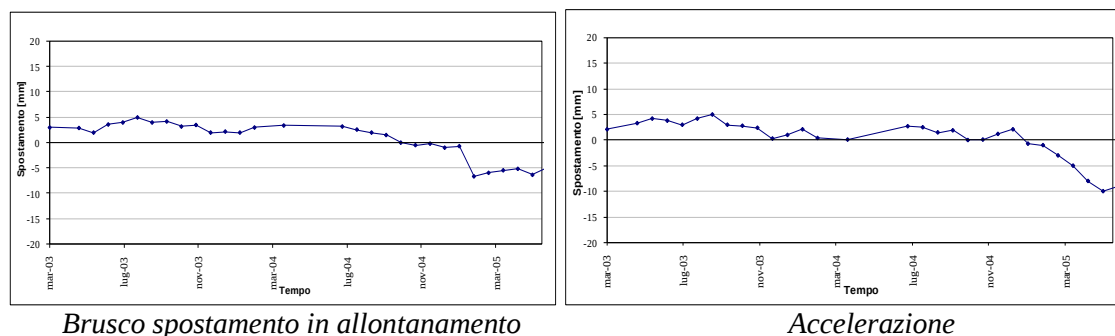


Fig. 104 - Esempi di serie storiche di deformazione che presentano *trend* ‘anomali’, in relazione alle diverse tipologie di fenomeni di dissesto che possono verificarsi.

Uno degli aspetti critici analizzati in fase di sperimentazione dei modelli di analisi delle serie storiche, riguarda la scelta dell’ampiezza dell’intervallo di aggiornamento. Le analisi condotte sulle aree test del progetto SAR.net hanno permesso di stabilire che, a causa della generale rumorosità delle misure di deformazione contenute all’interno delle serie storiche dei bersagli radar, l’ampiezza minima dell’intervallo di aggiornamento delle misure risulta pari a 6-8 acquisizioni.

I modelli di segnalazione dei *trend* anomali sperimentati e analizzati durante la ricerca sono i seguenti:

- Modello polinomiale di 1° grado
- Modello polinomiale di 2° grado
- Predittori lineari
- Modelli polinomiali e funzioni sinusoidali stagionali
- Modello di regressione con media mobile

Di seguito saranno fornite le caratteristiche dei diversi approcci di segnalazione, evidenziandone il funzionamento generale e le limitazioni. Soltanto per quelli che hanno prodotto i migliori risultati, ovvero l’uso di modelli polinomiali e funzioni sinusoidali stagionali e l’analisi statistica non parametrica, verrà fornita una descrizione più dettagliata.

Modello polinomiale di 1° grado

Uno dei primi approcci di monitoraggio, sperimentato su un *dataset* di immagini RADARSAT-1 acquisite sulla regione Lombardia ed elaborate mediante la tecnica PS, si è basato sulla suddivisione delle serie storiche di deformazione dei bersagli radar in due sotto-intervalli consecutivi (pregresso e aggiornamento) e sulla successiva stima della velocità media di deformazione (polinomio del 1° ordine) per ciascun intervallo (Fig. 105 e Fig. 106). Il confronto tra le velocità medie calcolate nel pregresso e nell’aggiornamento permette di individuare i PS che hanno registrato differenze di velocità tra i due periodi esaminati.

L'applicabilità della metodologia alla segnalazione di *trend* anomali è limitata dalle seguenti problematiche:

- a causa della rumorosità del dato di deformazione disponibile, la scelta dell'ampiezza dell'intervallo di aggiornamento influenza significativamente i risultati;
- l'accuratezza nella stima di velocità in corrispondenza di intervalli di tempo molto brevi (quali quelli relativi ad un aggiornamento) è molto bassa;
- brusche deformazioni avvenute tra il pregresso e l'aggiornamento non possono essere rilevate.

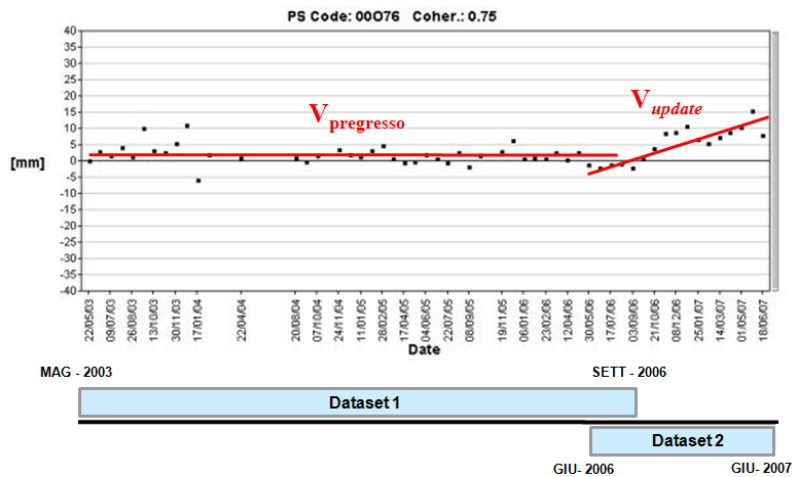


Fig. 105 - Schema di funzionamento del modello polinomiale di 1° ordine.

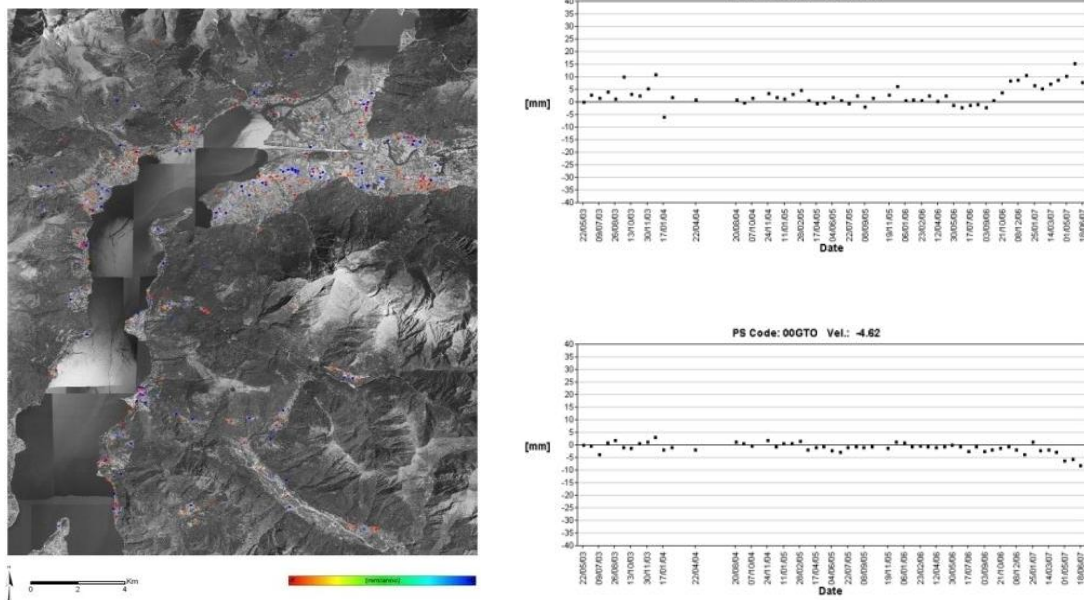


Fig. 106 - Distribuzione di bersagli radar ed esempi di serie storiche segnalate dal modello polinomiale di 1° ordine sull'area test in Lombardia.

Modello polinomiale di 2° grado

Un successivo tentativo si è basato sull'utilizzo di modelli polinomiali di 2° ordine. Assumendo che la presenza di moti in accelerazione nelle serie storiche dei bersagli radar indichi un cambiamento dello stato di attività dei fenomeni, è possibile descrivere le serie temporali di deformazione con polinomi di 2° grado e segnalare i punti caratterizzati da valori di accelerazione rilevante (Fig. 107).

Benché questo approccio abbia fornito risultati interessanti (Fig. 108), la sua applicabilità alla segnalazione di *trend* anomali è limitata da:

- difficoltà nell'individuazione delle variazioni segnalate all'interno della serie storica;
- inaccuratezza dei risultati nei casi di variazioni del tasso di deformazione prossime a uno degli estremi delle serie storiche;
- a causa dell'eterogeneità dei cambiamenti di *trend* che possono verificarsi in relazione ai diversi fenomeni di dissesto, l'utilizzo di un polinomio di 2° grado è inappropriato.

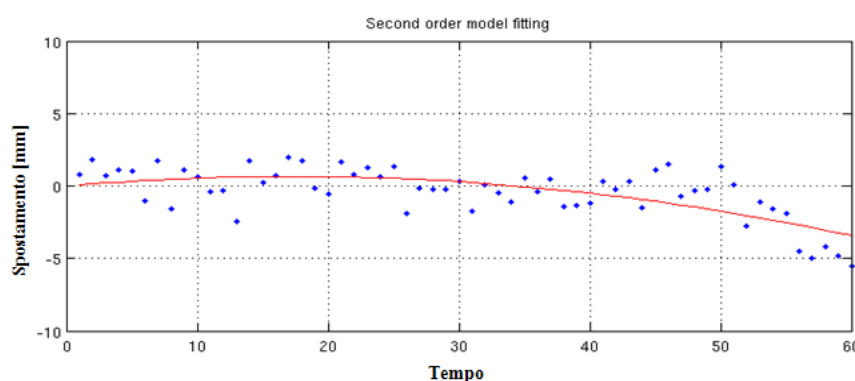


Fig. 107 - Schema di funzionamento del modello polinomiale di 2° ordine.

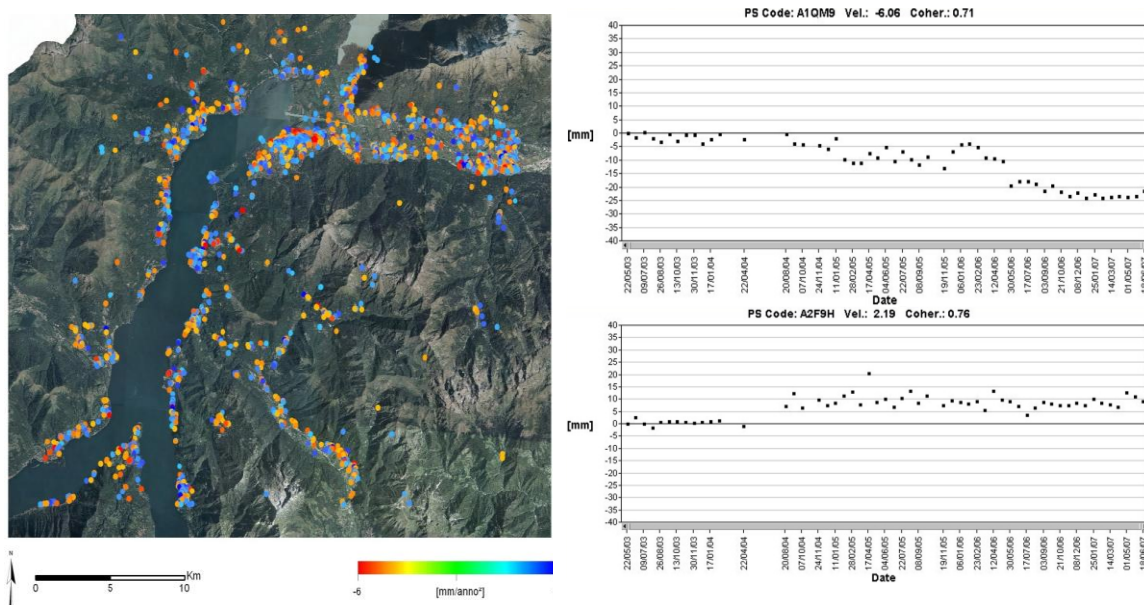


Fig. 108 - Distribuzione di bersagli radar ed esempi di serie storiche segnalate dal modello polinomiale di 2° ordine sull'area test in Lombardia.

Predittori lineari

Un'altra modalità di segnalazione analizzata consiste nell'utilizzo di un predittore lineare (Fig. 109). La serie storica di deformazione del bersaglio radar viene inizialmente divisa in pregresso e aggiornamento e un predittore lineare, quale il metodo di Yule Walker (Yule, 1927; Walker, 1931), viene applicato sulle misure di deformazione contenute nel pregresso.

Il predittore lineare prescelto, basandosi sulla combinazione lineare delle acquisizioni e senza l'introduzione di alcun modello di deformazione, viene quindi utilizzato per predire le misure di aggiornamento. Il bersaglio radar viene segnalato se le misure contenute nell'aggiornamento differiscono notevolmente da quelle predette.

Nei riguardi della segnalazione di *trend* anomali, questo approccio ha mostrato la seguente limitazione:

- scarsa predicibilità dei valori dell'aggiornamento legata all'elevata rumorosità dei dati del pregresso, al limitato numero di acquisizioni nelle serie storiche disponibili e alla loro distribuzione irregolare nel tempo.

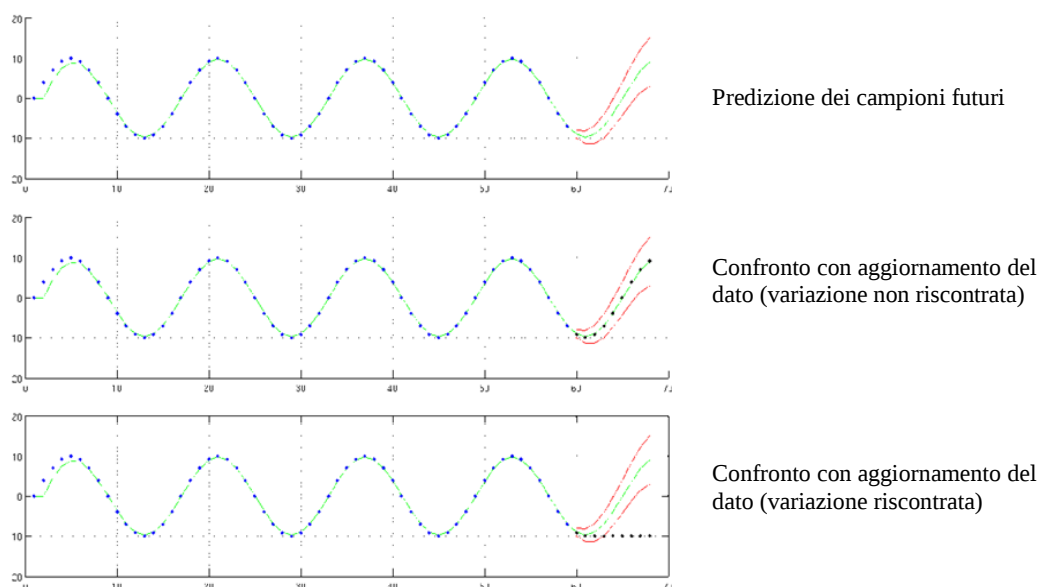


Fig. 109 - Schema di funzionamento del modello di segnalazione basato sull'utilizzo di predittori lineari: esempio dell'applicazione della predizione Yule Walker e del confronto con i dati aggiornati su una serie storica di deformazione artificiale.

Modelli polinomiali e funzioni sinusoidali stagionali

Questo approccio consiste nella modellazione delle serie storiche di deformazione dei bersagli radar con l'uso combinato di funzioni polinomiali di 1° grado e funzioni sinusoidali stagionali (Fig. 110). L'approccio è basato su un "anti-modello" ovvero permette la ricerca di bersagli radar le cui serie storiche di deformazione si discostano significativamente dal modello lineare con stagionalità.

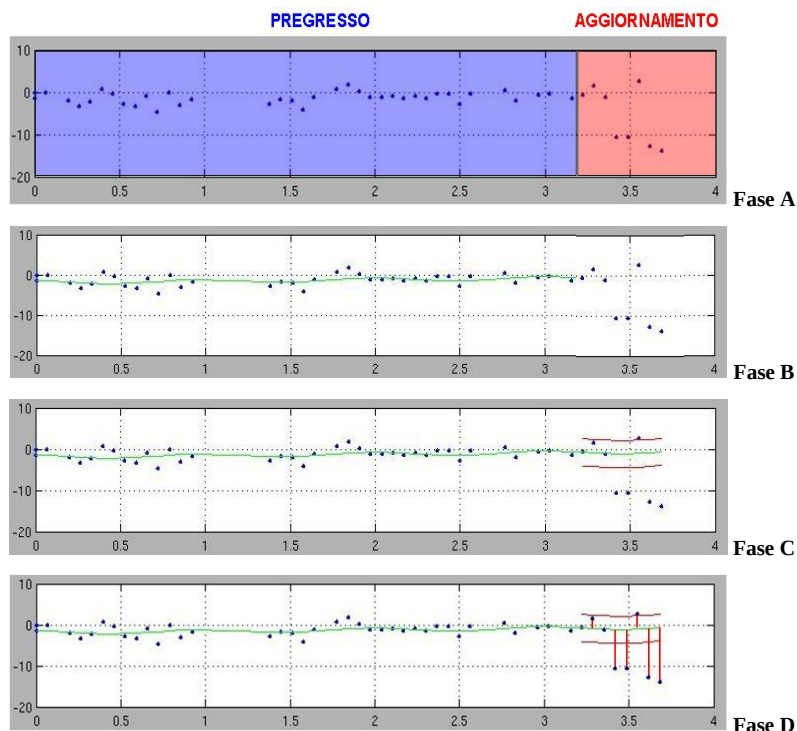


Fig. 110 - Schema di funzionamento del modello di segnalazione basato sull'utilizzo di polinomi di 1° grado e stagionalità.

Dal punto di vista operativo, la serie storica del bersaglio radar viene divisa in 2 parti, il pregresso e l'aggiornamento (fase A). Sul pregresso viene applicata una regressione con un polinomio di 1° grado e una stagionalità a fase annuale (fase B):

$$Y = m_0 + m_1 t + A \sin(2\pi t + \varphi)$$

in cui m_0 , m_1 , A e φ sono i parametri del modello che devono essere stimati per ogni serie storica di deformazione.

Il modello determinato sul pregresso viene usato per predire i valori futuri, usando come *error-bar* la deviazione standard (σ) delle misure *raw* del pregresso rispetto al modello (fase C).

L'analisi delle differenze tra i campioni provenienti dall'aggiornamento e quelli previsti con il modello, permette di stabilire se la serie storica del bersaglio radar possiede un comportamento anomalo.

Per evidenziare il differenziarsi del *trend* reale da quello atteso, si utilizzano i seguenti indici e parametri di anomalia (fase D):

- **err_i** , è la differenza tra la serie storica *raw* (Y_i) e l'andamento predetto nell'intervallo di aggiornamento:

$$A_i = Y_i - P_i$$

- **AI o Anomaly Index o indice di anomalia**, indica quanto, nell'intervallo di aggiornamento, la serie storica *raw* (Y_i) si discosta dalla predetta (P_i) in relazione alla variabilità della serie storica nel pregresso (σ):

$$AI = \frac{\sum_{i=N_p+1}^{N_p+N_u} |err_i|}{N_u \cdot \sigma}$$

- N_{err} , indica quanti valori della serie storica raw (Y_i) si discostano dal predetto (P_i) più della variabilità dei dati nel pregresso (σ), ovvero quanti err_i sono maggiori (in valore assoluto) di σ .

Varia tra 0 e N_u .

- **Consistenza**, indica quanti err_i sono maggiori di zero. Se la consistenza è alta, il *trend* è sopra il predetto. Varia tra 0 e N_u .

- **Monotonia**, indica quante acquisizioni possiedono err_i maggiore di quello precedente (err_{i-1}). Varia tra 0 e $(N_u-1)^{10}$.

- **A**, è il primo campione dell'autocorrelazione della serie storica raw e fornisce una misura della dipendenza temporale tra i valori di deformazione registrati all'interno dell'intervallo di tempo coperto dalle acquisizioni, attraverso la correlazione incrociata della serie storica con se stessa:

$$A = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (Y_i - Y_m)(Y_{i+1} - Y_m)}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_m)^2}$$

in cui Y_m è il valore medio della serie storica ed N è il numero complessivo di acquisizioni che compongono la serie storica raw .

La scelta dei parametri da sfruttare per la segnalazione e delle relative soglie rappresenta un passo critico dell'elaborazione poiché influenza notevolmente la quantità e la qualità delle serie storiche dei bersagli segnalati (Fig. 111). I criteri da seguire per la scelta delle soglie sono discussi nella sezione 5.4.1.1.

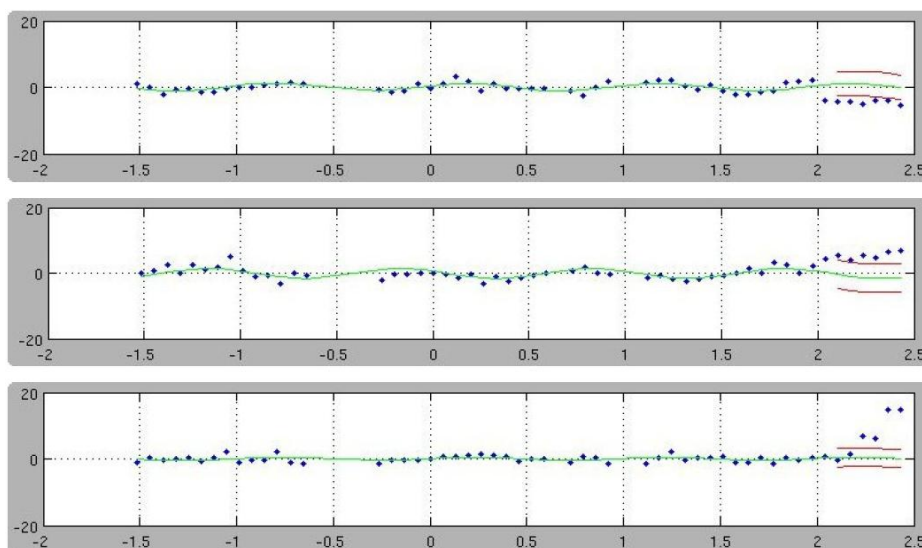


Fig. 111 - Segnalazione di *trend* di deformazione anomali – Modello di segnalazione basato sull'utilizzo di polinomi di 1° grado e stagionalità: esempi di serie storiche selezionate imponendo la soglia di autocorrelazione pari a 0,6 e quella dell'indice di anomalia AI pari a 2.

L'applicabilità della metodologia alla segnalazione di *trend* anomali è limitata dalle seguenti problematiche:

¹⁰ Il valore massimo della monotonia risulta pari a (N_u-1) perché il primo valore di Δ_i non può essere mai maggiore di se stesso.

- se sono presenti eventi deformativi rilevanti (es. bruschi spostamenti, accelerazioni) all'interno del pregresso, la previsione dei valori dell'aggiornamento viene falsata perché i parametri del modello risentono della loro presenza;
- l'individuazione di un modello lineare per descrivere il pregresso, richiede la disponibilità di un significativo numero di misure di deformazione, aumentando la probabilità di includere all'interno del modello anche gli eventi deformativi registrati nel pregresso.

Modello di regressione con media mobile

Questo approccio si basa sulla modellazione delle serie storiche di deformazione dei bersagli radar con un modello di regressione basato sull'uso della media mobile (Fig. 112).

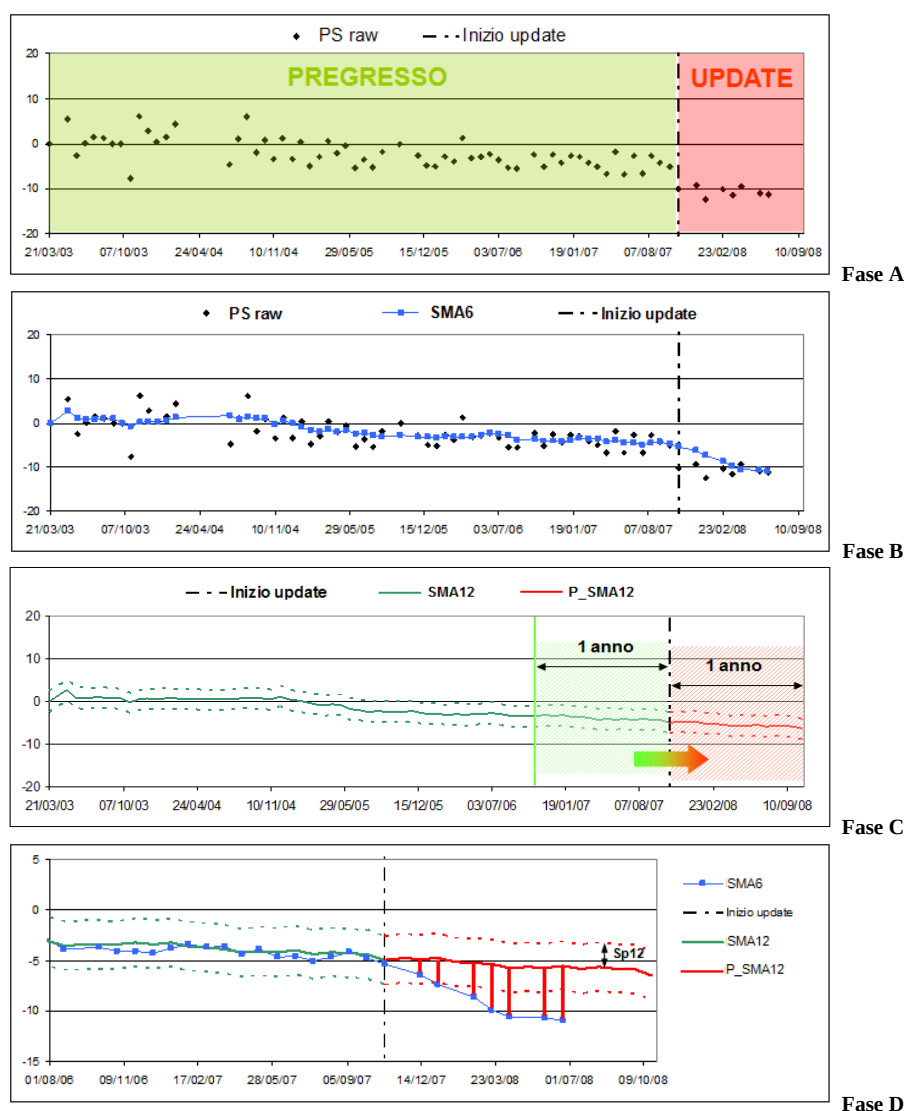


Fig. 112 - Schema di funzionamento del modello di segnalazione basato sull'utilizzo dell'analisi statistica non parametrica.

L'utilizzo di un approccio che descrive le serie storiche mediante l'uso della media mobile, consente di non stabilire a priori una specifica legge di deformazione (es. polinomio di 1° o di 2° grado) e fornisce la possibilità di effettuare la previsione dei valori futuri utilizzando solo un sottointervallo del pregresso, in modo da escludere dalla previsione eventuali eventi deformativi che si sono verificati nel passato.

Dal punto di vista operativo, la serie storica del bersaglio radar viene inizialmente divisa in 2 parti, il pregresso (p) e l'*update* (u) (fase A).

Il rumore della serie storica viene ridotto mediante l'applicazione di una media mobile semplice asimmetrica con periodo 6 acquisizioni (fase B):

$$SMA6_i = \frac{\sum_{n=i-5}^i Y_n}{6}$$

in cui $SMA6$ è la *Simple Moving Average*, media mobile semplice asimmetrica¹¹ di ordine 6 e Y_n è il valore di deformazione misurato in corrispondenza della n -sima acquisizione.

All'interno dell'intervallo di *update*, l'andamento della $SMA6$ viene assunto quale serie storica "*smoothed*" di riferimento (R) al posto della serie storica *raw*.

La serie storica predetta viene descritta da un scarto quadratico medio pari a quello del pregresso ($Sp12$) e il suo andamento viene determinato estrapolando la media mobile a periodo 12 mesi relativa all'annualità precedente (fase C):

$$SMA12_i = \frac{\sum_{n=i-11}^i Y_n}{12} \quad \text{e} \quad Sp12 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (Y_i - SMA12_i)^2}{N_p - 1}}$$

in cui $SMA12$ è la media mobile semplice asimmetrica¹² di ordine 12 (utilizzata per ridurre la componente di deformazione stagionale) e $Sp12$ è lo scarto quadratico medio dei dati del pregresso rispetto alla $SMA12$ (fornisce una misura della variabilità dei dati rispetto alla $SMA12$).

La predizione dei dati dell'*update* mediante l'uso della $SMA12$ relativa all'annualità precedente, è dovuta al fatto che il comportamento che ci si attende nell'aggiornamento è simile a quello del passato.

L'analisi delle differenze tra i campioni provenienti dall'aggiornamento e quelli previsti con il modello, permette di stabilire se la serie storica del bersaglio radar possiede un comportamento anomalo.

Per evidenziare il differenziarsi del *trend* reale da quello atteso, si utilizzano una serie di indici e parametri di anomalia (fase D).

I parametri utili per effettuare la segnalazione dei *trend* anomali sono i seguenti:

- Δ_i , è la differenza tra la serie storica di riferimento (R) e l'andamento predetto (P) nell'intervallo di *update*:

$$\Delta_i = R_i - P_i = SMA6_i - P_SMA12_i$$

in cui R_i è il valore di deformazione di riferimento relativo all'acquisizione i e P_i è il valore di deformazione predetta relativo all'acquisizione i .

¹¹ La $SMA6_i$ viene calcolata come media dei valori di deformazione ricadenti all'interno di una finestra che comprende il valore i e le 5 acquisizioni precedenti.

¹² La $SMA12_i$ viene calcolata come media dei valori di deformazione ricadenti all'interno di una finestra che comprende il valore i e le 11 acquisizioni precedenti.

- **AI_1 e AI_2 , Anomaly Indexes o Indici di anomalia**, indicano quanto, nell'intervallo *update*, la serie storica di riferimento (R) si discosta dalla predetta (P) in relazione alla variabilità della serie storica nel pregresso ($Sp12$):

$$AI_1 = \frac{\sum_{i=N_p+1}^{N_p+N_u} |\Delta_i|}{N_u \cdot Sp12} \quad AI_2 = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=N_p+1}^{N_p+N_u} \Delta_i^2}{N_u}}}{Sp12}$$

- **N_d** , indica quanti valori della serie storica di riferimento (R_i) si discostano dal predetto (P_i) più della variabilità dei dati nel pregresso ($Sp12$), ovvero quanti Δ_i sono maggiori (in valore assoluto) di $Sp12$. Varia tra 0 e N_u .
- **Consistenza**, indica quanti Δ_i sono maggiori di zero. Se la consistenza è alta, il *trend* è sopra il predetto. Varia tra 0 e N_u .
- **Monotonia**, indica quante acquisizioni possiedono Δ_i maggiore di quello precedente (Δ_{i-1}). Varia tra 0 e $(N_u-1)^{13}$.
- **C** , è la cross-correlazione, una misura dello scostamento della serie storica *raw* rispetto al valore della *SMA12*.

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |Y_i - SMA12_i| |Y_{i+1} - SMA12_{i+1}|}{\sum_{i=1}^N (Y_i - SMA12_i)^2}$$

in cui Y_{i+1} è il valore di deformazione registrato all'interno della serie storica *raw* in corrispondenza dell'acquisizione $i+1$.

Anche in questo caso, la scelta dei parametri da sfruttare per la segnalazione e delle relative soglie, rappresenta un passo critico dell'elaborazione poiché influenza notevolmente la quantità e la qualità delle serie storiche dei bersagli segnalati (Fig. 113). I criteri da seguire per la scelta delle soglie sono discussi nella sezione 5.4.1.1.

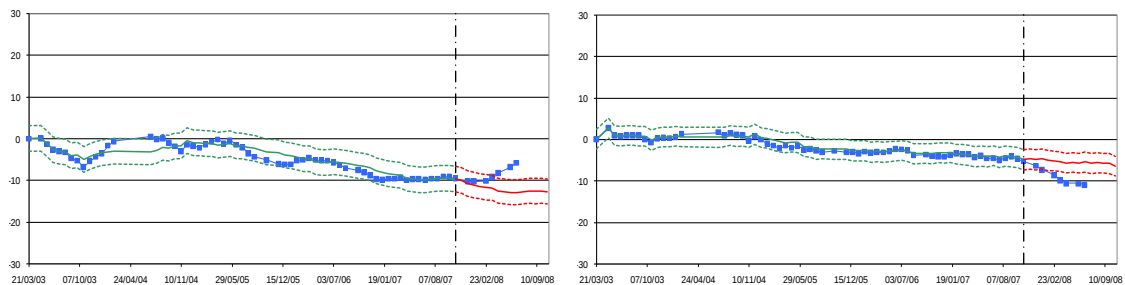


Fig. 113 - Segnalazione di *trend* di deformazione anomali mediante l'uso di analisi statistica non parametrica: esempi di serie storiche segnalate scegliendo la soglia di autocorrelazione pari a 0,6, quella di N_d pari a 1 e quella dell'indice di anomalia AI_1 pari a 0,8.

¹³ Il valore massimo della monotonia risulta pari a (N_u-1) perché il primo valore di Δ_i non può essere mai maggiore di se stesso.

L'applicabilità della metodologia alla segnalazione di *trend* anomali è limitata dalla seguente problematica:

- l'uso della media mobile asimmetrica per la modellazione delle serie storiche, fa sì che ciascun valore di deformazione *smoothed* di riferimento dipenda dai valori registrati nelle 5 acquisizioni precedenti. Ciò provoca un ulteriore ritardo temporale nella segnalazione dei *trend* anomali, che si aggiunge al tempo necessario per l'aggiornamento, la ri-elaborazione e l'interpretazione dei dati.

5.4.2 Area test: Stromboli (Sicilia)

Nell'ambito della ricerca riguardante la possibilità di utilizzo operativo di dati radar per il sistema satellitare di monitoraggio e allertamento per il rischio idrogeologico, è stata condotta la sperimentazione sull'elaborazione di immagini acquisite dai nuovi satelliti radar ad altissima risoluzione, quali COSMO-SkyMed, TerraSAR-X e RADARSAT-2. L'utilizzo di dati acquisiti da satelliti ad altissima risoluzione spaziale (fino ad 1 m) e elevata frequenza di acquisizione (1 immagine ogni 11-16 giorni), permette infatti di potere ottenere misure di deformazione con una frequenza di campionamento adeguata per potere progettare in futuro l'utilizzo operativo dell'interferometria radar satellitare a scopo di allertamento in 'tempo reale'.

Nell'ambito della partecipazione del Centro di Competenza del DST-UNIFI al Tavolo tecnico presso il DPC "Linee guida per il piano di acquisizione COSMO-SkyMed per acquisire serie temporali da utilizzare per indagini di tipo interferometrico multi-immagine con finalità di Protezione Civile", sono state analizzate ed elaborate alcune acquisizioni COSMO-SkyMed relative all'area della Sicilia orientale e, in particolare, all'isola di Stromboli, messe a disposizione di ASI e dal DPC al DST-UNIFI a Marzo 2009. Tali immagini sono state acquisite lungo orbite ascendenti e discendenti, dai satelliti CSK1 e CSK2 in modalità *StripMap* *Himage* (risoluzione di circa 3 m; cfr. 2.2.3) *right-looking*, polarizzazione HH e sono relative al periodo Agosto 2008 – Gennaio 2009 (Fig. 114 e Fig. 115).

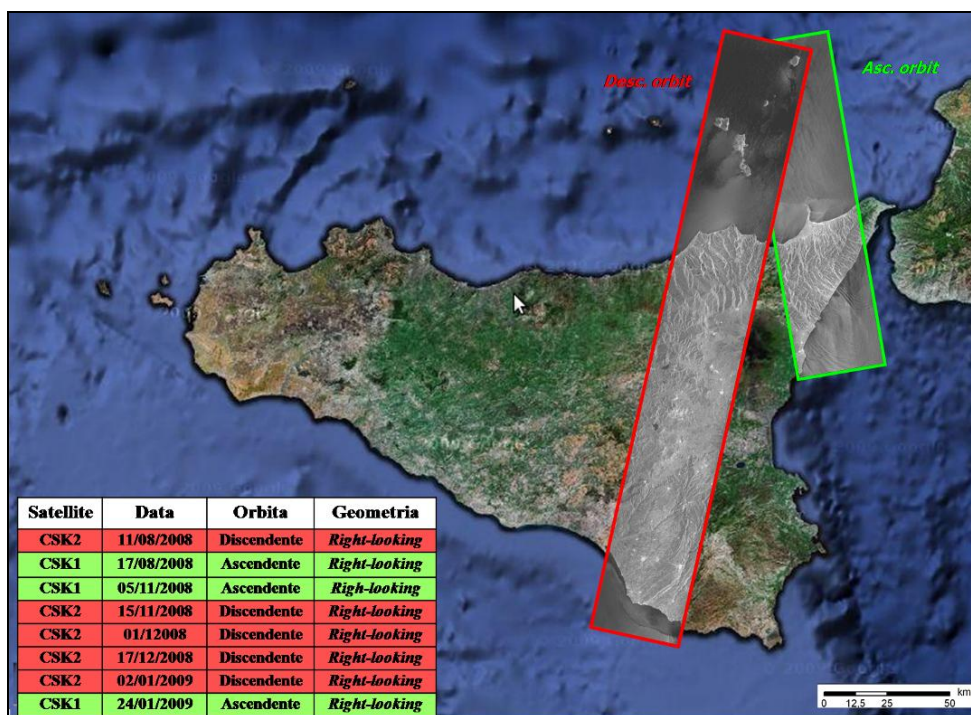


Fig. 114 - Informazioni di dettaglio e ubicazione delle immagini COSMO-SkyMed acquisite lungo orbite ascendenti e discendenti su Stromboli messe a disposizione da ASI a Marzo 2009. In rosso sono indicate le immagini in geometria discendente e in verde quelle in geometria ascendente.

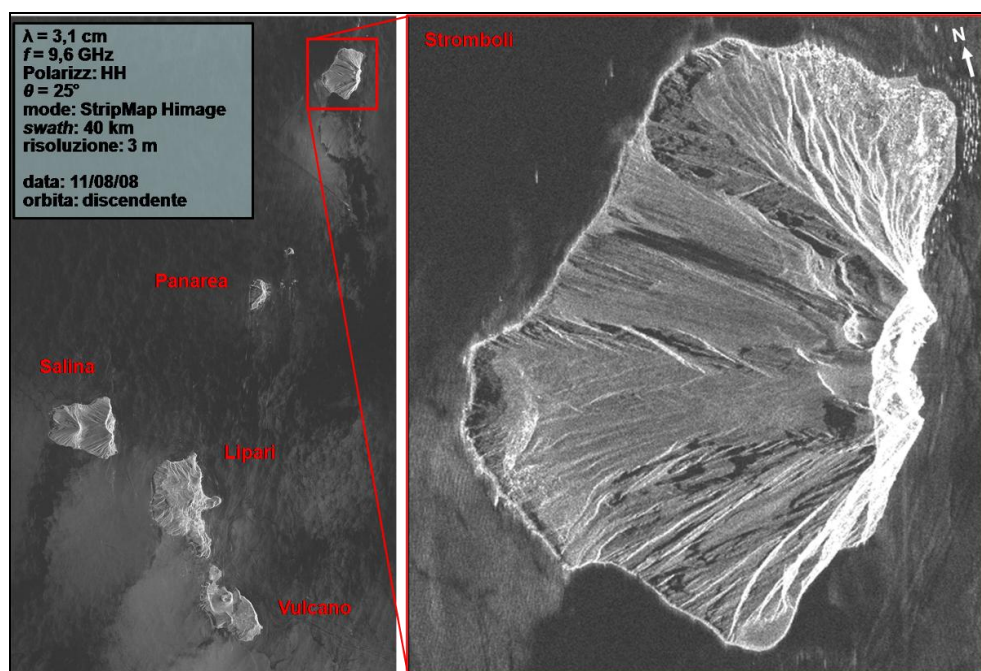


Fig. 115 - Esempio di immagine COSMO-SkyMed acquisita lungo orbita discendente sull'area di Stromboli. L'immagine è rappresentata in coordinate SAR.

I suddetti dati sono stati elaborati dalla scrivente con tecnica DInSAR (cfr. 2.3) mediante l'utilizzo del Gamma SAR Interferometry Software, in possesso del DST-UNIFI.

In Fig. 116 è riportato un interferogramma differenziale non srotolato, ottenuto mediante l'elaborazione DInSAR di due immagini acquisite lungo orbite discendenti in date 01/12/2008 e 17/12/2008. La sottrazione della componente topografica è stata effettuata utilizzando un DTM di risoluzione 5 m, realizzato successivamente agli eventi effusivi di Febbraio-Marzo 2007 (apertura di bocche effusive ed esplosione parossistica del 15 Marzo) e messo a disposizione dal DPC.

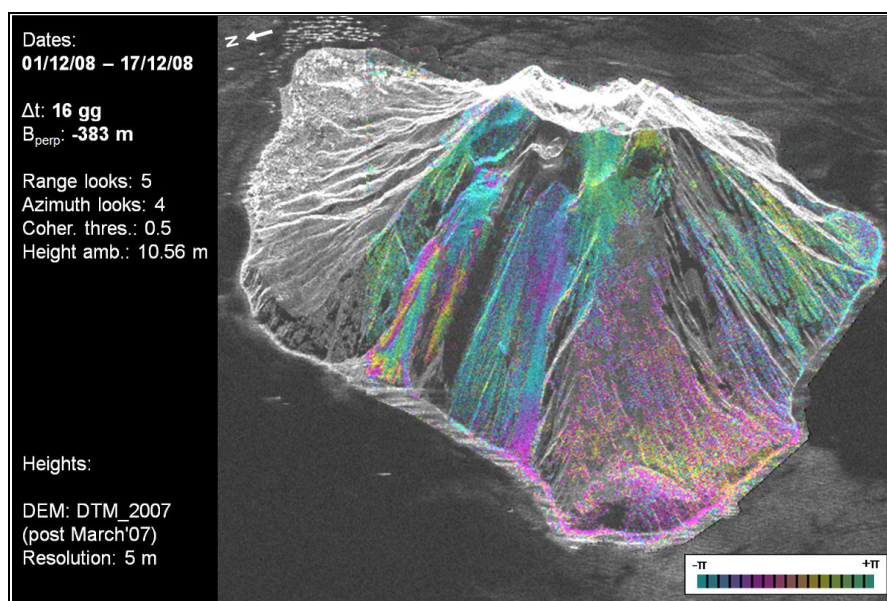


Fig. 116 - Interferogramma COSMO-SkyMed ottenuto mediante l'elaborazione di immagini acquisite lungo orbite discendenti in date 01/12/08 e 17/12/08. La sottrazione della componente topografica è stata effettuata utilizzando un DTM di risoluzione 5 m, realizzato successivamente all'evento di Febbraio-Marzo 2007.

Grazie al ridottissimo tempo che intercorre tra le due acquisizioni (16 gg) e alla ridotta *baseline* spaziale (383 m), l'interferogramma mostra una buona coerenza nell'area della Sciarra del Fuoco ed inoltre sono chiaramente identificabili alcuni segnali di deformazione di circa 3 cm (0,2 cm/giorno) nella parte settentrionale della scarpata, probabilmente associabili al movimento di materiale lungo la stessa, all'accumulo al piede ed al progressivo movimento verso il mare.

Questa sperimentazione ha dimostrato come le analisi interferometriche di dati ad altissima risoluzione spaziale nonché tempo di rivisitazione piuttosto ridotto, consentano di misurare fenomeni deformativi che evolvono con velocità più elevate di quelle convenzionalmente monitorabili con dati in banda C (fino a 10-15 cm/anno) e di caratterizzare i comportamenti deformativi a scala più di dettaglio (risoluzione di pochi metri; contro i 20-25 m delle immagini in banda C).

5.4.3 Area test: L'Aquila (Abruzzo)

Nell'ambito delle attività legate all'emergenza per il terremoto avvenuto in Abruzzo ad Aprile 2009, si è presentata la prima opportunità di realizzazione di un archivio completo, continuo e sistematico di immagini COSMO-SkyMed utilizzabile per interferometria multi-immagine a scopi di monitoraggio e allertamento.

In seguito agli eventi sismici di Aprile 2009, ASI, in accordo con il Tavolo tecnico interferometrico e su richiesta del DPC, ha attivato la pianificazione di emergenza per le immagini COSMO-SkyMed, in modo da garantire, il massimo numero di acquisizioni sulle aree colpite dal terremoto e creare, nei mesi successivi, il primo e unico archivio sistematico di immagini COSMO-SkyMed (CSK1, CSK2 e CSK3).

L'archivio è stato costituito progressivamente nel corso del 2009 e si è composto di 4 *dataset* di acquisizioni caratterizzati ciascuno da geometria di acquisizione costante nel tempo (in modo da potere garantire l'utilizzo delle immagini per analisi multi-interferometriche) e frequenza di acquisizione media di 5 immagini/mese (Fig. 117).

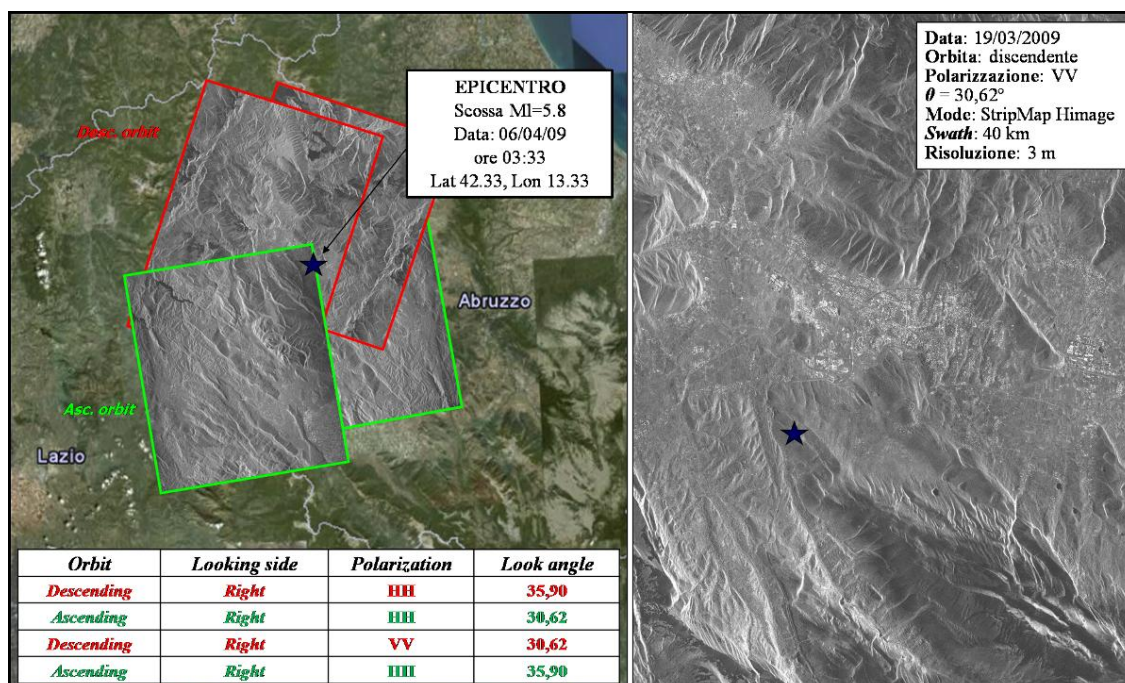


Fig. 117 - Informazioni e ubicazione delle aree coperte dalle acquisizioni COSMO-SkyMed pianificate per l'emergenza in Abruzzo ad Aprile 2009 (sinistra) ed esempio di immagine dell'area interessata dal terremoto (destra).

I suddetti archivi di dati COSMO-SkyMed sono stati resi disponibili mediante l'*OPERA WEB CATALOGUE* per il download da parte dei Centri di Competenza coinvolti nelle attività

concernenti l'emergenza per il Terremoto dell'Aquila o, in alcuni casi, sono stati direttamente trasferiti ai centri di elaborazione dati.

I dati COSMO-SkyMed acquisiti sull'Abruzzo sono stati elaborati con successo da parte dell'Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (IREA-CNR), dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e del Politecnico di Milano (POLIMI), coordinatamente con TeleRilevamento Europa (TRE). Tali gruppi di ricerca hanno sperimentato la creazione di serie temporali di deformazione utilizzando i *dataset* COSMO-SkyMed disponibili, che hanno permesso, una volta terminate, di analizzare la storia completa delle deformazioni post-sismiche nell'area colpita dal terremoto, in modo da mettere in luce eventuali riattivazioni o nuove attivazioni di dissesti idrogeologici provocate dall'evento sismico.

La suddetta analisi, rappresenta una delle prime sperimentazioni e *test* dei dati COSMO-SkyMed ed è stata finalizzata alla valutazione delle potenzialità di tali dati per il monitoraggio in tempo quasi-reale delle deformazioni superficiali legate al rischio idrogeologico.

I risultati preliminari delle elaborazioni multi-interferogramma ottenuti a fine Settembre 2009 nell'ambito del progetto MORFEO (MONitoraggio e Rischio da Frana mediante dati EO), hanno confermato che il sistema è capace di fornire, su aree vaste, misure ad elevata risoluzione ed accuratezza. L'esito positivo di questi *test* preliminari e, i progressi già mostrati dalle prime applicazioni con dati acquisiti dal satellite TerraSAR-X, ha messo in luce che il sistema di acquisizione COSMO-SkyMed, in un futuro prossimo, potrà ragionevolmente essere inserito all'interno della catena operativa del Sistema di Allerta Nazionale per il rischio idrogeologico, attualmente in fase di organizzazione e progettazione.

Questo primo *test* della catena operativa per la pianificazione, l'acquisizione, la trasmissione e l'elaborazione dei dati COSMO-SkyMed in seguito ad una emergenza, si è rivelato decisamente positivo per avere confermato sia le caratteristiche tecniche dei suddetti dati sia le potenzialità operative del piano di acquisizione richiesto dal DPC in seguito all'emergenza. L'utilizzo operativo di tali dati all'interno del Sistema di Allerta Nazionale per il rischio idrogeologico, presenta tuttavia numerosi aspetti da perfezionare:

- creazione di protocolli per la trasmissione di dati dai satelliti, ai *ground segment* e fino ai centri di elaborazione dei dati (minimizzazione dei tempi di trasferimento);
- definizione e standardizzazione dei prodotti di elaborazione InSAR (garantire omogeneità dei prodotti);
- definizione delle procedure di aggiornamento delle elaborazioni per ogni nuovo dato disponibile;
- progettazione della catena operativa per la radar-interpretazione dei prodotti multi-interferometrici ad ogni successivo aggiornamento (analisi anomalie su serie storiche di deformazione);
- calibrazione e validazione delle procedure di segnalazione delle aree a rischio e determinazione dei livelli di criticità.

5.4.4 Area test: Caltanissetta (Sicilia)

In occasione dell'evento deformativo che ha interessato l'area di Caltanissetta-Santa Barbara nell'Agosto del 2008, è stata per la prima volta implementata la procedura per l'individuazione delle aree critiche, secondo l'approccio metodologico presentato nella sezione 5.4.1.

Il centro abitato di Caltanissetta si sviluppa all'interno del Bacino di Caltanissetta, un'unità paleogeografico-sedimentaria che, dal tardo Miocene al Quaternario, ha costituito il bacino di avanfossa tra il *foreland* ibleo e il *thrust-front* appenninico-magrebide. Nell'area in esame affiorano diffusamente i depositi pliocenici e, solo marginalmente, quelli miocenici della serie Gessoso-Solfifera.

L'11 Agosto 2008 il centro abitato è stato interessato da diversi dissesti, legati a fenomeni franosi nel quartiere Santa Flavia e Sant'Anna, e a vulcanismo sedimentario in località Santa Barbara (Fig. 118). Tali dissesti hanno condotto all'evacuazione di alcune abitazioni significativamente compromesse da danni strutturali (fatturazione degli elementi portanti).

Inoltre, in località Santa Barbara, diversi pali della corrente elettrica sono stati divelti, le strade asfaltate hanno riportato diverse lesioni, con spaccature, cunette e avvallamenti di estensione pari a diversi decimetri, e numerosi danni sono stati riscontrati anche sulla strada statale 122 (Fig. 119).

Il vulcanismo sedimentario è un tipico fenomeno che si manifesta in zone d'accrezione, con formazione di vulcani di fango localizzati lungo il margine esterno delle catene, caratterizzato da un regime di sforzi compressivi. Tale fenomeno si manifesta sottoforma di emissioni di gas, acqua e fango, più o meno violente. La risalita del fango e del gas avviene in seguito a due effetti combinati, la spinta di galleggiamento dei sedimenti sepolti (dovuta alla differenza di densità tra il materiale argilloso, sedimentato così rapidamente da non consentire l'eliminazione dei fluidi e della sostanza organica in esso contenuta al momento della deposizione, ed i depositi sovrastanti a più alta densità) e l'incremento della pressione interstiziale dei fluidi all'interno degli stessi sedimenti (generata da processi tettonici e/o diagenetici).

I prodotti espulsi durante l'evento in località Santa Barbara, composti essenzialmente da materiale argilloso, hanno ricoperto una porzione di terreno di circa 12.000 m², con un diametro massimo di 120 m e uno spessore massimo di 3,5 m, per un totale di circa 10.000 m³.

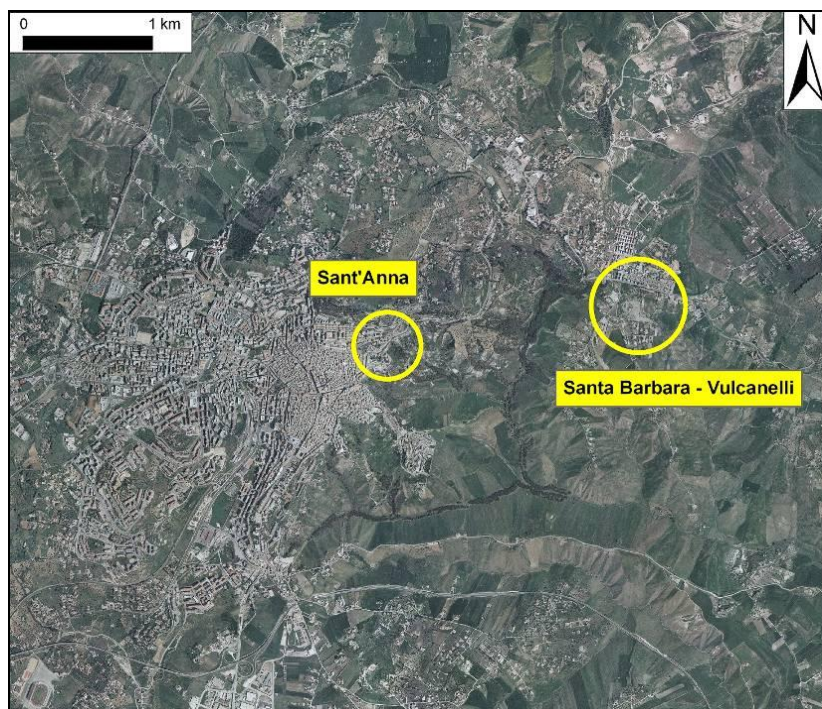


Fig. 118 - Ubicazione delle aree interessate dai dissesti dell'11 Agosto 2008, località Santa Barbara-Vulcanelli e quartiere Santa Flavia e Sant'Anna, Caltanissetta.



Fig. 119 - Foto dei dissesti alle abitazioni ed alle infrastrutture verificatesi l'11 Agosto 2008 nell'area dei Vulcanelli (da <http://www.vigilfuoco.it/notiziario/notizia.asp?codnews=6780>).

Sono stati analizzati i dati RADARSAT 2003-2008, aggiornati all'immagine subito precedente all'evento dell'Agosto 2008, sono stati sottocampionati su griglia regolare quadrata di lato 100 m e, per ogni cella della griglia, è stato ricavato un PS sintetico la cui serie storica rappresenta la media delle serie storiche dei PS contenuti nella cella (la mediazione permette di lavorare su serie storiche meno rumorose), come mostrato in Fig. 120.

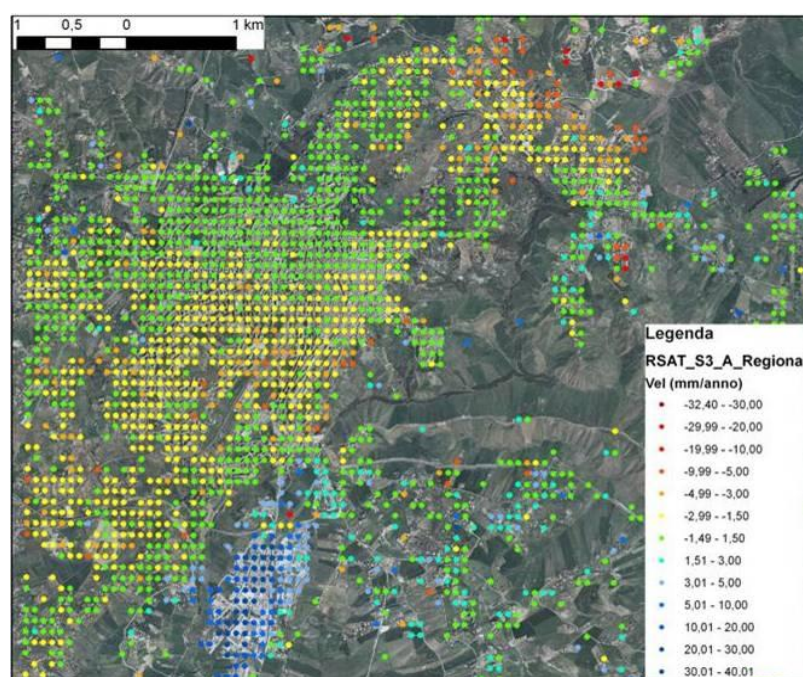


Fig. 120 - Dati RADARSAT-1 2003-2008 in geometria ascendente, elaborati con tecnica PS e successivamente ricampionati secondo una griglia regolare di cella 100 m x 100 m.

Un primo approccio per la sperimentazione del modello ha visto l'analisi delle serie storiche sintetiche mediante un modello polinomiale di primo ordine combinato con una sinusoide per la valutazione della componente stagionale del movimento. Tale modello è stato applicato alla parte pregressa della serie storica sintetica e i suoi parametri sono stati successivamente utilizzati per eseguire la predizione della serie storica nell'intervallo di aggiornamento. I valori di spostamento dell'aggiornamento sono stati quindi confrontati con l'andamento predetto, e i punti le cui serie storiche si discostano dall'andamento predetto sono stati segnalati come 'anomali'. Nel caso specifico, come parametro di anomalia è stato utilizzato il rapporto tra la somma degli errori tra il dato reale dell'aggiornamento e l'andamento predetto, e la variabilità della serie storica nel pregresso (deviazione standard).

Un secondo approccio per la sperimentazione del modello di segnalazione si è invece basato sull'utilizzo di medie mobili. In particolare, sui dati pregressi è stata calcolata la media mobile semplice di ordine 12 ed il relativo scarto quadratico medio. Successivamente, la predizione dell'andamento della serie storica nell'aggiornamento è stata estrapolata dai valori della media mobile dell'anno precedente all'aggiornamento (i.e. si assume che nell'intervallo di aggiornamento l'andamento sia lo stesso di quello della media mobile dell'anno precedente). Anche in questo secondo approccio sono state dunque calcolate le differenze tra il dato reale di spostamento nell'intervallo di aggiornamento e l'andamento predetto, ed è stato usato come parametro di anomalia il rapporto tra le differenze tra il dato reale e la serie predetta e la variabilità della serie storica nel pregresso (scarto quadratico medio).

La sogliatura dei parametri di anomalia ha permesso di individuare chiaramente PS con incrementi anomali delle deformazioni nell'intervallo di aggiornamento nell'area dei Vulcanelli-Santa Barbara, con entrambi gli approcci utilizzati (zona 1, Fig. 121). I dati hanno individuato anche altre zone 'anomale' per comportamento della serie storica nell'intervallo di aggiornamento (Fig. 121): l'area Monte San Giuliano (zona 2), l'area industriale sud (zona 3) e l'area centro-occidentale del centro abitato (zona 4, Fig. 122).

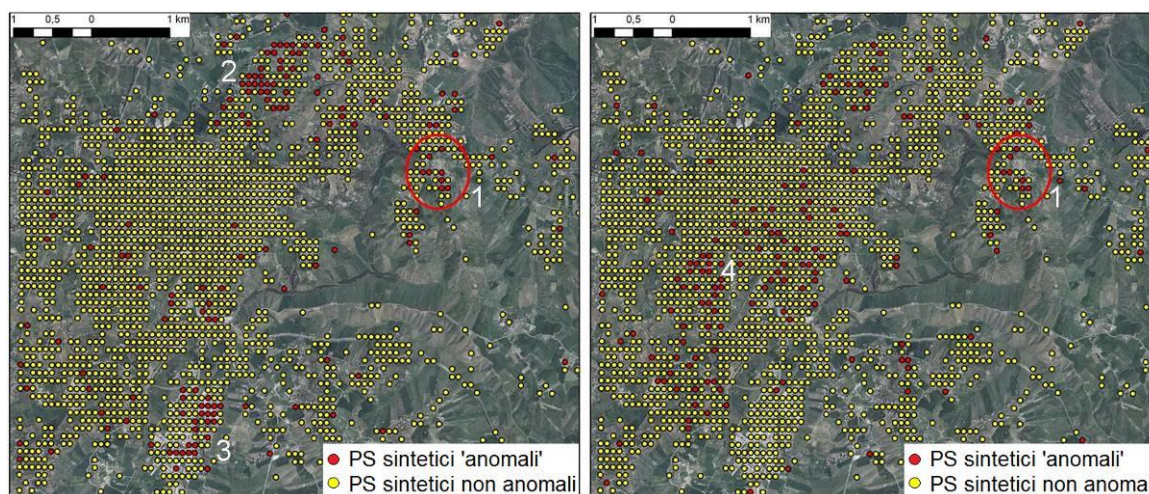


Fig. 121 - Sogliatura dei PS sintetici: approccio lineare combinato a stagionalità (sinistra) e approccio con media mobile (destra). Zona 1: Vulcanelli-Santa Barbara; zona 2: Monte San Giuliano; zona 3: settore industriale sud; zona 4: settore centro-occidentale.

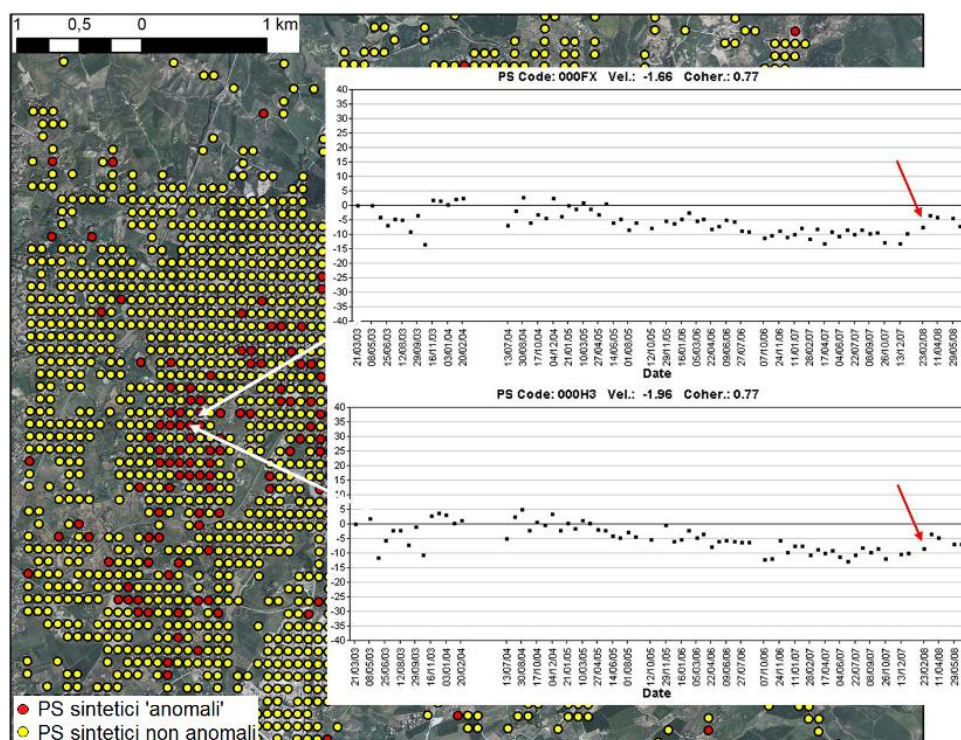


Fig. 122 - Esempi di serie storiche segnalate nell'area centro-occidentale di Caltanissetta. L'evento deformativo del febbraio 2007 viene individuato dall'analisi degli andamenti anomali.

L'analisi ha condotto all'individuazione delle seguenti aree:

- Vulcanelli-Santa Barbara (area 1 in Fig. 121): area ad alta criticità, correlata al progressivo incremento della deformazione che ha portato alla violenta emissione di gas, acqua e fango dell'Agosto del 2008;
- Monte San Giuliano e settore centro-occidentale (rispettivamente zona 2 e zona 4 in Fig. 121): aree interessate da movimenti gravitativi legati alla presenza di un substrato argilloso causa di dissesti generalizzati lungo i versanti del centro abitato; le anomalie sono state attribuite ad un incremento delle deformazioni nel Febbraio 2007, caratterizzato da un livello di criticità medio-basso poiché molto limitato nel tempo e con bassa intensità;
- settore industriale sud (zona 3 in Fig. 121): area a bassa criticità, correlata ad un decremento delle deformazioni indotte dall'espansione delle argille in un'area di recente urbanizzazione.

I PS sintetici segnalati come anomali sono stati quindi raggruppati spazialmente utilizzando un criterio semplice basato sul raggruppamento di celle anomale vicine e l'isolamento di celle il cui PS sintetico è stato indicato come anomalo nell'aggiornamento ma che sono circondate da celle a comportamento non anomalo (Fig. 123). Sono attualmente oggetto di studio alcuni modelli geostatistici finalizzati non solo alla delimitazione delle aree contenenti PS anomali, ma anche alla valutazione della variabilità spaziale e dell'intensità dell'anomalia all'interno delle stesse aree segnalate.

L'applicazione all'area test di Caltanissetta ha fornito un chiaro esempio di individuazione di aree critiche che, dalla sola analisi delle velocità medie di deformazione, non sarebbero state identificate (es. area NO di Monte San Giuliano, Fig. 124). Al contrario, tale analisi ha mostrato inoltre che alcune aree caratterizzate da velocità di deformazione annuale sostenute (es. area soggetta a deformazioni gravitative nel settore NE del centro abitato, Santa Barbara NO, Fig. 124) non costituiscono invece aree critiche poiché caratterizzate da serie storiche conformi al modello atteso (es. alte velocità, ma mantenutesi costanti nel tempo).

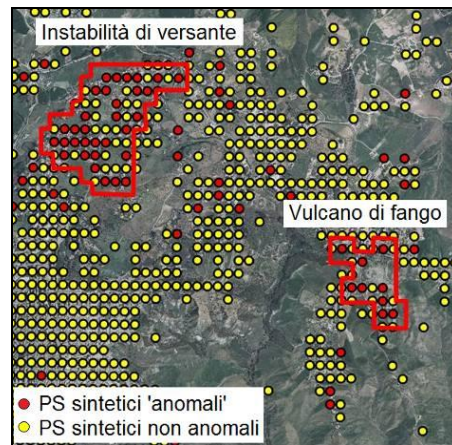


Fig. 123 - Sogliatura dei PS sintetici e raggruppamento in aree 'anomale': dettaglio delle aree dei Vulcanelli-Santa Barbara (zona 1) e Monte San Giuliano (zona 2).

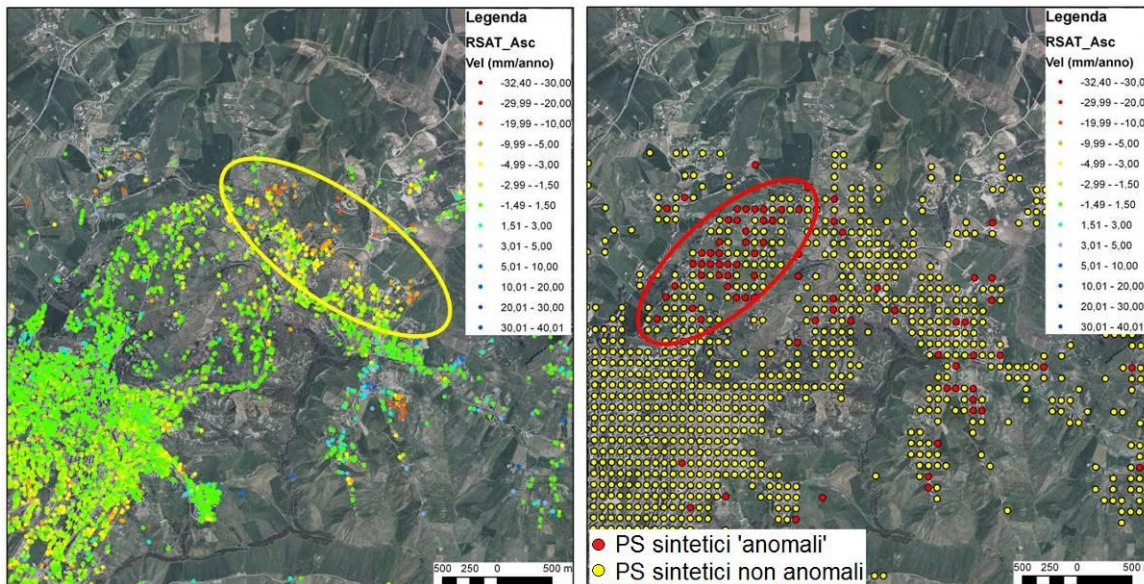


Fig. 124 - Dati PS visualizzati per velocità media (sinistra) e dati sintetici cui è stato applicato il modello di segnalazione (destra). L'area in giallo (Santa Barbara NO) individuabile dalle velocità medie (sinistra) non è evidenziata come anomala in fase di monitoraggio (destra); viceversa, l'area segnalata come anomala in fase di monitoraggio (area segnata in rosso; Monte San Giuliano) presenta velocità medie classificabili come stabili.

6 DISCUSSIONE

Come dimostrato grazie ai diversi casi applicativi analizzati durante lo svolgimento della presente ricerca, le tecniche interferometriche si sono dimostrate un valido supporto per la gestione del rischio geologico, fornendo un valido contributo nelle sue diverse fasi: sia le attività di individuazione e inventario (cfr. 5.1), sia quelle di caratterizzazione e mappatura (cfr. 5.2 e 5.3), nonché il monitoraggio e la sorveglianza (cfr. 5.4), possono infatti trarre un notevole beneficio dalla radar-interpretazione di misure InSAR e PSI.

Di seguito sono affrontate e discusse le principali potenzialità e limitazioni delle diverse metodologie di radar-interpretazione, in relazione ai risultati ottenuti mediante le differenti sperimentazioni condotte nell'ambito della presente ricerca.

6.1 Individuazione e inventario

L'applicazione della metodologia di individuazione e inventario dei fenomeni per l'aggiornamento della mappa inventario della Calabria Centrale, ha messo in luce che tale approccio rappresenta un utile strumento per l'individuazione, la mappatura e l'analisi qualitativa e quantitativa di fenomeni franosi, sia pre-mappati sia non rilevati mediante tecniche tradizionali.

Sono di seguito discusse le principali potenzialità e attuali limitazioni della metodologia proposta (Tabella 11; Cigna et al., 2010a; cfr. allegato).

Parametro	INDIVIDUAZIONE E INVENTARIO	
	Potenzialità/Applicabilità	Attuali limitazioni
Velocità dei dissesti e direzione di deformazione	• Frane 'molto lente' e 'estremamente lente' (la strumentazione convenzionale richiederebbe tempi molto lunghi) • Deformazioni sub-verticali e/o orizzontali E-O (misurabili discretamente lungo le LOS)	• Frane da 'lente' a 'estremamente rapide' (decorrelazione temporale; problemi di <i>phase unwrapping</i>) • Deformazioni sub-orizzontali N-S (non rilevabili lungo le LOS)
Risoluzione e scala spaziale	• Frane a scala locale e larga scala (area < 1.000 km²) • Risoluzione spaziale (ENVISAT, ca. 20 m), ottima per analisi a scala regionale e/o larga, buona per scala locale	• Frane a larga scala (area > 1.000 km²) • Risoluzione spaziale migliorabile con dati COSMO-SkyMed o TerraSAR-X, per analisi a scala locale
Uso del suolo	• Frane che coinvolgono ambienti urbani e/o rocce esposte (alta densità di bersagli)	• Frane con elevata copertura vegetale (difficile identificazione di bersagli radar; scarsa penetrazione del segnale)

Tabella 11 - Analisi delle potenzialità e limitazioni della metodologia di individuazione e inventario, basata sulla sperimentazione eseguita sull'area test della Calabria Centrale.

Grazie alle caratteristiche di precisione, copertura areale e multi-temporalità, l'interferometria radar satellitare ha permesso di eseguire il riconoscimento delle aree instabili, anche in zone di scarsa accessibilità o caratterizzate da elevata estensione, e di osservare la loro evoluzione nel tempo, con tempi piuttosto contenuti rispetto alle tecniche di controllo convenzionali.

Al contrario di quanto ottenibile per mezzo della sola fotointerpretazione, le nuove frane mappate grazie alla radar-interpretazione o gli aggiornamenti del perimetro o dello stato di attività di quelle già presenti nella mappa inventario, si sono concentrate principalmente nelle aree antropizzate, all'interno delle quali la densità di bersagli radar si è rivelata nettamente più elevata. Infatti, le elaborazioni interferometriche sulle immagini radar, ed in particolare i risultati delle tecniche multi-interferogramma, risultano complementari all'interpretazione di immagini ottiche, poiché queste ultime forniscono buone informazioni in zone poco urbanizzate dove le forme naturali sono ben visibili e non sconvolte dall'azione antropica, al contrario le immagini radar si prestano bene per lo studio delle deformazioni in area urbana, nella quale sono presenti manufatti che ben riflettono il segnale (cfr. 2.4).

La difficoltà, o spesso l'impossibilità, di ricavare misure di deformazione in presenza di copertura vegetale (cfr. 2.3.2 e 2.4.3) è legata alla riduzione della penetrazione del segnale radar al suolo e ai conseguenti problemi di decorrelazione. In diverse applicazioni condotte nell'ambito scientifico (es. Strozzi et al., 2005), è stato tuttavia dimostrato che l'utilizzo di segnali caratterizzati da lunghezze d'onda più elevate, riesce a limitare gli effetti di decorrelazione temporale legati sia alla presenza della vegetazione, sia alle elevate velocità di deformazione, a scapito però della precisione delle misure ottenute (cfr. 2.2.2).

Nonostante la metodologia possieda caratteristiche promettenti per l'individuazione dei fenomeni franosi sia a scala larga sia a scala locale, sono diverse le limitazioni alla sua applicabilità. Queste sono legate principalmente alla capacità delle tecniche interferometriche di apprezzare deformazioni solamente lungo la direzione di linea di vista del satellite (cfr. 2.3.2 e 2.4.3) e al fatto che, per portare a termine con successo un'analisi, è necessario che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di bersagli radar (lieve urbanizzazione o presenza di rocce esposte). Inoltre, per l'analisi dei fenomeni di deformazione che possiedono un'evoluzione più rapida (cfr. 3.2), ovvero che evolvono con tassi di deformazione superiori a 10-15 cm/anno (limite valido per i sensori in banda C; es. ERS1/2 ed ENVISAT), il problema legato all'ambiguità di fase rende difficoltosa l'elaborazione interferometrica poiché può provocare problemi di decorrelazione temporale che riducono o compromettono la qualità dei risultati dell'analisi.

Un'ultima problematica fondamentale legata alle tecniche multi-interferogramma, riguarda la relatività delle misure. Le misure di deformazione vengono infatti riferite alla posizione di un punto di riferimento a terra di coordinate note (cfr. 2.4) e possono quindi essere soggette a *offset* indotti dai movimenti cui è soggetto il punto di riferimento stesso. Tale *offset* può essere rimosso in fase di elaborazione o post-elaborazione (cfr. 4.2.1), ma rappresenta un ostacolo al confronto quantitativo delle misure interferometriche satellitari con i dati rilevati *in situ*.

6.2 Caratterizzazione temporale e spaziale

L'applicazione della metodologia di caratterizzazione temporale e spaziale dei fenomeni per l'analisi dei fenomeni deformativi che hanno interessato il centro abitato di Naro e che interessano la città di Morelia, ha messo in luce le notevoli potenzialità di questo approccio innovativo nell'ambito della gestione del rischio geologico.

Sono di seguito discusse le principali potenzialità e limitazioni della metodologia proposta (Tabella 12; Cabral-Cano et al., 2010a e 2010b; Casagli et al., 2009; Cigna et al., 2010b e under review; cfr. allegati), che si aggiungono agli aspetti già discussi e analizzati nell'ambito della trattazione relativa alla metodologia di individuazione e inventario.

Come dimostrato dalle sperimentazioni condotte per i centri abitati di Naro e Morelia, la metodologia di caratterizzazione si è rivelata uno strumento estremamente utile per il controllo delle deformazioni di singoli centri abitati e per la comprensione delle peculiarità dei dissesti avvenuti nel 2005 (nel caso di Naro) e attualmente in atto (nel caso di Morelia).

Per quanto concerne la disponibilità di immagini SAR per analisi interferometriche in tempo differito, legate cioè al *back monitoring* delle deformazioni pregresse di specifici fenomeni di dissesto o per la mappatura su vasta scala, è possibile sfruttare le immagini di archivio dei numerosi satelliti che hanno acquisito a partire dal 1992 fino ad oggi, quali ERS1/2 (1992-

2001), ENVISAT (2002-oggi), RADARSAT-1 (2003-oggi) o, in alternativa, dati SAR acquisiti in tempi più recenti, come quelli dei satelliti RADARSAT-2 (2007-oggi), TerraSAR-X e COSMO-SkyMed (2008-oggi) (cfr. 2.2). Questi ultimi, tuttavia, spesso non hanno garantito un'adeguata copertura spaziale e temporale dell'intero territorio. Così, l'implementazione di analisi interferometriche per la caratterizzazione dei fenomeni di dissesto è molto influenzata dalla disponibilità effettiva di dati sull'area di interesse.

Parametro	CARATTERIZZAZIONE TEMPORALE E SPAZIALE	
	Potenzialità/Applicabilità	Attuali limitazioni
Dati SAR	• Vasta disponibilità di dati di archivio acquisiti da ERS1/2, ENVISAT, RADARSAT1/2, TerraSAR-X, costellazione COSMO-SkyMed, ecc. • <i>Back monitoring</i> di deformazioni passate (1992-2001) e recenti (2003-oggi) (es. Naro e Morelia)	• La copertura temporale e spaziale del territorio non è omogenea e completa • La disponibilità di dati di archivio può limitare la fattibilità dell'analisi
Peculiarità del dissesto	• L'analisi consente di ricostruire la geometria e la storia deformativa del dissesto, nonché evidenziarne la tipologia e le cause (es. Naro e Morelia) • I contributi di diversi fenomeni sovrapposti (es. subsidenza e tettonica) possono essere parzialmente distinti (es. Morelia) • L'estensione dell'area interessata dal dissesto (passato) può essere valutata (es. Naro)	• Deformazioni veloci (oltre 10-15 mm/anno per dati in banda C) possono essere equivocate • Movimenti orizzontali N-S non sono rilevabili e/o ricostruibili
Riconoscimento di accelerazioni e/o alterazioni	• L'analisi di dettaglio delle serie storiche di deformazione può rivelare la presenza di componenti diverse dalla linearità, come bruschi spostamenti e/o accelerazioni (es. Naro)	• Deviazioni elevate dal modello di deformazione (lineare) non possono essere rilevate
Modello di deformazione	• Modelli lineari per la descrizione delle componenti di fase legate alle deformazioni seguono bene tipologie di fenomeni con comportamento regolare e costante nel tempo (es. Morelia e Naro) • Possibilità di utilizzare modelli di deformazione che si adattano maggiormente all'evoluzione temporale del dissesto (es. modelli quadratici per subsidenza; es. Morelia, area del Rio Grande)	• Fenomeni accelerati, elevate variazioni di trend deformativo e comportamenti non-lineari, non sono ben modellati con il convenzionale modello lineare

Tabella 12 - Analisi delle attuali potenzialità e limitazioni della metodologia di caratterizzazione temporale e spaziale, basata sulle sperimentazioni eseguite sulle aree test di Naro e Morelia.

L'applicabilità delle tecniche interferometriche al controllo dei dissesti è limitata, come discusso anche nella sezione 3, da una serie di fattori legati alle caratteristiche interne delle stesse tecniche ed alle peculiarità dei fenomeni deformativi indagati. La principale limitazione è legata alla possibilità di misurare soltanto movimenti che possiedono un'evoluzione molto lenta o estremamente lenta e l'impossibilità di controllare fenomeni a evoluzione rapida (cfr. 3.2). Deformazioni che superano i 10-15 cm/anno (per dati in banda C) possono infatti essere equivocate (cfr. 2.3 e 2.4) e possono provocare problemi di decorrelazione temporale che riducono o compromettono la qualità dei risultati dell'analisi.

L'analisi eseguita su Naro ha dimostrato le notevoli potenzialità dell'approccio di analisi di dettaglio e interpretazione avanzata delle serie storiche di deformazione per il riconoscimento di deviazioni dal modello di deformazione scelto in fase di elaborazione PSI (tipicamente lineare) e riconoscimento di componenti diverse dalla linearità, come bruschi spostamenti e/o

accelerazioni. Tuttavia, le deviazioni elevate dal modello di deformazione (lineare) non possono essere rilevate e vengono spesso equivocate.

La possibilità di utilizzare modelli di deformazione che si adattano maggiormente all'evoluzione temporale del dissesto (es. modelli quadratici per subsidenza; come necessario nella città di Morelia, area del Rio Grande), sta progressivamente contribuendo alla risoluzione di tale problematica. Infatti, fenomeni accelerati, elevate variazioni di trend deformativo e comportamenti non-lineari, non sono ben modellati con il convenzionale modello lineare.

6.3 Mappatura rapida e valutazione del rischio residuo

L'implementazione della metodologia di mappatura rapida dei dissesti e valutazione del rischio residuo per l'analisi dei fenomeni deformativi in atto nei centri abitati di Agrigento e M'dina, nonché le diverse esperienze condotte nell'ambito della partecipazione al progetto SAR.net, hanno messo in luce le notevoli potenzialità di questo approccio innovativo nell'ambito della gestione del rischio geologico, evidenziando allo stesso tempo le attuali limitazioni che richiederanno futuri sviluppi e miglioramenti.

Sono di seguito discusse le principali potenzialità e limitazioni della metodologia proposta (Tabella 13; Cigna et al., 2010b e submitted; cfr. allegati), in aggiunta agli aspetti già analizzati nell'ambito della trattazione relativa alle metodologie di individuazione, inventario e caratterizzazione.

MAPPATURA RAPIDA E VALUTAZIONE DEL RISCHIO RESIDUO		
Parametro	Potenzialità/Applicabilità	Attuali limitazioni
Estensione e localizzazione	- Analisi dello scenario pre-evento (<i>back monitoring</i>) - Individuazione di aree soggette a deformazioni non riconoscibili a occhio nudo o con rilievi <i>in situ</i> (pochi mm/anno) o in cui non si sono verificati danni strutturali evidenti (es. Agrigento)	- Fenomeni rapidi o non preceduti da precursori non possono essere identificati <i>Shadowing</i>, <i>foreshortening</i> e <i>layover</i> possono ostacolare in area urbana l'identificazione di bersagli (es. M'dina)
Previsione e prevenzione	- Identificazione di aree potenzialmente soggette a riattivazioni e/o accelerazioni (precursori; es. Agrigento) - Riconoscimento di aree ad alta criticità, e conseguente focalizzazione degli interventi di stabilizzazione (es. M'dina e Agrigento) - Identificazione dei settori da monitorare con strumentazione <i>in situ</i> (es. M'dina)	Movimenti rapidi o in direzione N-S o che interessano elementi poco riflettenti il segnale radar, non possono essere identificati e misurati (es. M'dina)
Rischio residuo	- Analisi di stabilità post-evento (deformazioni residue), valutazione di pericolosità e rischio residuo, e aggiornamento perimetrazione (es. Agrigento) - Individuazione di aree per ri-localizzazione di elementi a rischio - Valutazione efficacia interventi di stabilizzazione (es. Agrigento)	- Necessità di numero consistente di acquisizioni SAR post-evento (analisi PSI) e conseguente prolungamento dei tempi complessivi di analisi - Possibile errata interpretazione delle variazioni dello scenario osservato quali ipotetici effetti di stabilizzazione (es. causate da assenza di bersagli radar; es. M'dina e Agrigento)

Tabella 13 - Analisi delle attuali potenzialità e limitazioni della metodologia di mappatura rapida e valutazione del rischio residuo, basata sulle sperimentazioni eseguite sulle aree test di Agrigento e M'dina.

La metodologia di mappatura rapida consente agevolmente di analizzare la storia deformativa e lo scenario pre-evento, grazie all'uso dell'approccio di *back monitoring* ed alla generale disponibilità di archivi di immagini acquisite in passato. L'individuazione delle aree soggette a deformazione superficiale può essere eseguita anche in presenza di fenomeni ad evoluzione molto lenta (pochi mm/anno), non facilmente rilevabili con strumentazione *in situ*, o spesso non riconoscibili o identificabili a occhio nudo, spesso non monitorati con strumentazione convenzionale prima della manifestazione evidente delle deformazioni.

L'analisi sul centro abitato di Agrigento e, in particolare, i risultati ottenuti per l'area di interesse del versante settentrionale, hanno mostrato come sia possibile identificare aree che in futuro possono essere soggette a riattivazioni e/o ulteriori accelerazioni, mediante l'individuazione di movimenti precursori (es. deformazioni della scalinata della Cattedrale di Agrigento). Inoltre, tale analisi ha permesso di riconoscere le aree a maggiore criticità in modo da consentire la futura focalizzazione su di esse degli interventi di mitigazione più idonei (es. Cattedrale e Seminario di Agrigento) o, in altri casi, l'ottimizzazione della programmazione di campagne di monitoraggio *in situ* (es. M'dina).

Tuttavia, fenomeni di deformazione rapidi e/o non preceduti da movimenti precursori sono risultati di difficile identificazione mediante analisi PSI. Inoltre, gli effetti di *shadowing*, *foreshortening* e *layover* possono ostacolare in area urbana l'identificazione di bersagli e, componenti di spostamento orizzontali in direzione N-S o, che interessano elementi poco riflettenti il segnale radar, non possono essere agevolmente identificati e misurati (es. M'dina), come precedentemente detto nell'ambito della discussione delle metodologie di individuazione, inventario e caratterizzazione.

I buoni risultati ottenuti dalla sperimentazione eseguita sull'area di Agrigento hanno messo in luce l'efficacia di analisi di stabilità post-evento (deformazioni residue) per la valutazione di pericolosità residua ed il correlato aggiornamento delle perimetrazioni esistenti.

Le esperienze derivanti dalla partecipazione al progetto SAR.net, hanno altresì evidenziato la capacità dell'approccio di mappatura rapida nei confronti dell'individuazione di aree per ri-localizzazione di elementi a rischio, nonché della valutazione efficacia interventi di stabilizzazione. Tuttavia, le analisi post-evento con tecniche PSI richiedono necessariamente la disponibilità di un numero consistente di acquisizioni SAR post-evento e provocano un conseguente prolungamento dei tempi complessivi di analisi (acquisizione, elaborazione e interpretazione delle misure). Inoltre, talvolta alcune variazioni dello scenario osservato (modificazioni antropiche, nuove costruzioni, demolizioni, ecc.) possono condurre ad una possibile errata interpretazione geologica e alla falsa dichiarazione di ipotetici effetti di stabilizzazione, dovuti invece a scarse densità o anche ad una totale assenza di bersagli radar all'interno dell'area di interesse.

6.4 Monitoraggio e sorveglianza

Le sperimentazioni condotte sulle aree di Stromboli, L'Aquila e Caltanissetta, hanno permesso di mettere alla prova alcune delle fasi della metodologia di monitoraggio e sorveglianza, attualmente in fase di progettazione, evidenziandone le attuali potenzialità e limitazioni, nonché chiarificandone i requisiti fondamentali (Tabella 14).

Ad oggi, le tecniche satellitari multi-interferogramma possiedono notevoli e adeguate potenzialità per il monitoraggio e sorveglianza in tempo reale dei fenomeni di dissesto geologico, sia a scala locale che nazionale. Tuttavia, la loro applicabilità a livello operativo, rende necessari i seguenti requisiti relativi ai dati SAR, le elaborazioni PSI e l'interpretazione delle misure PSI: copertura uniforme e regolare del territorio, tempi di acquisizione, elaborazione e interpretazione compatibili con il concetto di 'tempo reale', nonché disponibilità di dati ancillari omogenei. Inoltre, a tali requisiti si aggiungono quelli strettamente connessi con la metodologia di sorveglianza e allertamento satellitare, ovvero la necessità di definizione e calibrazione degli appropriati modelli di segnalazione per le diverse aree di interesse, nonché di standardizzazione delle procedure e anche dei risultati delle elaborazioni multi-interferometriche.

Le esperienze maturate nel corso degli anni hanno evidenziato che, per offrire un servizio di monitoraggio in tempo reale operativo, è fondamentale la disponibilità di immagini radar satellitari acquisite con regolarità, uniformità e frequenza elevata.

Parametro	MONITORAGGIO E SORVEGLIANZA	
	Attuali potenzialità	Sviluppi futuri
Copertura temporale	• RADARSAT-2, COSMO-SkyMed e TerraSAR-X possono fornire acquisizioni regolari (es. L'Aquila) • Piano di acquisizione COSMO-SkyMed sperimentato e validato (es. L'Aquila)	• Programmazione e pianificazione delle acquisizioni SAR sulle aree di interesse con <i>revisiting time</i> regolare
Conformità con il 'tempo reale'	• Le risoluzioni temporali dei satelliti operativi (es. banda X) rientrano nel 'tempo reale' (es. L'Aquila e Stromboli)	• Definizione di protocolli operativi per l'acquisizione, l'elaborazione e l'interpretazione delle misure PSI
Copertura spaziale e conformità con la 'scala nazionale'	• RADARSAT-2, TerraSAR-X e COSMO-SkyMed possono fornire copertura regolare (es. L'Aquila) • Il territorio nazionale può essere integralmente coperto con dati SAR (es. PST-A e pianificazione di <i>background</i> COSMO-SkyMed)	• Programmazione e pianificazione delle acquisizioni SAR sulle aree di interesse con <i>revisiting time</i> regolare (es. acquisizioni COSMO-SkyMed sul territorio italiano) • Progettazione di una metodologia di calibrazione delle misure PSI con la rete geodetica nazionale IGM
Risoluzione delle misure	• Dati SAR con diverse risoluzioni (da 1 m a 20-30 m): compatibilità sia con larga scala sia con analisi di dettaglio (es. Stromboli) • TerraSAR-X e COSMO-SkyMed acquisiscono dati ad alta risoluzione (fino a 1 m), compatibile anche con analisi a scala locale (es. Stromboli)	• Definizione delle appropriate scale spaziali di analisi, calibrate in relazione ai fenomeni che interessano le aree investigate
Geometria di acquisizione	• Possono essere costruiti archivi SAR omogenei, anche in condizioni di emergenza (es. L'Aquila)	• Programmazione futura di archivi SAR omogenei per ciascuna delle aree di interesse
Dati ancillari	• Elevata disponibilità e varietà di dati ancillari e tematici	• Omogeneizzazione dei dati sul territorio nazionale
Definizione e calibrazione modelli di segnalazione	• I modelli di segnalazione analizzati permettono di identificare alcune 'anomalie' del campo deformativo (es. Caltanissetta), non rilevabili da pura analisi di velocità medie	• Calibrazione e taratura dei modelli su diverse tipologie di fenomeni e ambienti
Risultati delle elaborazioni PSI	• Elevata risoluzione (oltre 1.000 PS/km²) conseguente a quella dei dati SAR	• Standardizzazione delle procedure e dei risultati delle elaborazioni PSI

Tabella 14 - Analisi delle potenzialità e limitazioni della metodologia di monitoraggio e sorveglianza, basata sulla sperimentazione eseguita sulle aree test di Sciara del Fuoco, L'Aquila e Caltanissetta.

A scopo di monitoraggio e sorveglianza, benché siano oggi disponibili numerosi sensori, non tutti garantiscono una regolare acquisizione sul territorio nazionale. Il satellite ENVISAT ad esempio, nonostante il tempo di rivisitazione nominale di 35 giorni, a causa delle diverse modalità di acquisizione disponibili e della possibilità di programmare alcuni cicli di acquisizione, garantisce soltanto 5 o 6 immagini all'anno in modalità *ERS-like* sull'intero territorio italiano, riducendo quindi il tempo di ricopertura a circa 70 giorni. Anche il nuovo

satellite ALOS della JAXA, benché acquisisca dai primi mesi del 2006 con un tempo di ricopertura di 46 giorni, non riesce a garantire la regolarità delle acquisizioni sul territorio nazionale. Infatti, per evitare conflitti tra i diversi utenti dei dati del satellite, l'agenzia spaziale giapponese ha pianificato le acquisizioni dei primi 4 anni e sul territorio italiano è attualmente disponibile una copertura di 2 o 3 immagini l'anno, sufficienti per analisi interferometriche differenziali, ma insufficienti per analisi multi-interferogramma.

Il satellite RADARSAT-1, benché abbia acquisito con regolarità sul territorio italiano dal 2003, attualmente sta progressivamente riducendo e in alcuni casi interrompendo la frequenza delle acquisizioni. Al contrario il satellite RADARSAT-2, nonché i nuovi satelliti ad alta risoluzione, COSMO-SkyMed e TerraSAR-X, possiedono attualmente le potenzialità per potere attivare una copertura regolare e uniforme sulle aree di interesse, prospettando un possibile utilizzo dei dati a fini di monitoraggio e fornendo un aggiornamento mensile o bi-settimanale delle misure.

Un'altra problematica relativa alla disponibilità di dati radar satellitari per la creazione e l'operatività di un servizio di monitoraggio e sorveglianza in tempo reale e a scala nazionale, è legata alla necessità di disporre, per la continuazione di un archivio interferometrico, di immagini acquisite sia con la stessa geometria di vista, sia con segnali di uguali caratteristiche. Tale problematica è già stata riscontrata nel passaggio tra i satelliti ERS1/2 ed il satellite ENVISAT. I due diversi sensori montati a bordo, utilizzano infatti segnali con lunghezze d'onda e frequenze leggermente diverse (5,3 GHz per ERS e 5,331 GHz per ENVISAT), ostacolando la costituzione di un unico archivio continuo dal 1992 ad oggi (cfr. 2.2.1). Lo stesso problema si presenta oggi per lo sfruttamento congiunto delle immagini SAR acquisite dai satelliti RADARSAT-1 e RADARSAT-2 della CSA (frequenze di acquisizione pari a 5,3 GHz per RADARSAT-1 e di 5,405 GHz per RADARSAT-2).

Tutte le problematiche affrontate mettono in luce l'importanza della programmazione delle strategie di acquisizione delle nuove missioni, quali RADARSAT-2, TerraSAR-X o la costellazione italiana COSMO-SkyMed, per garantire nel futuro un'adeguata, uniforme e regolare copertura del territorio nazionale con le acquisizioni SAR (Fig. 125).

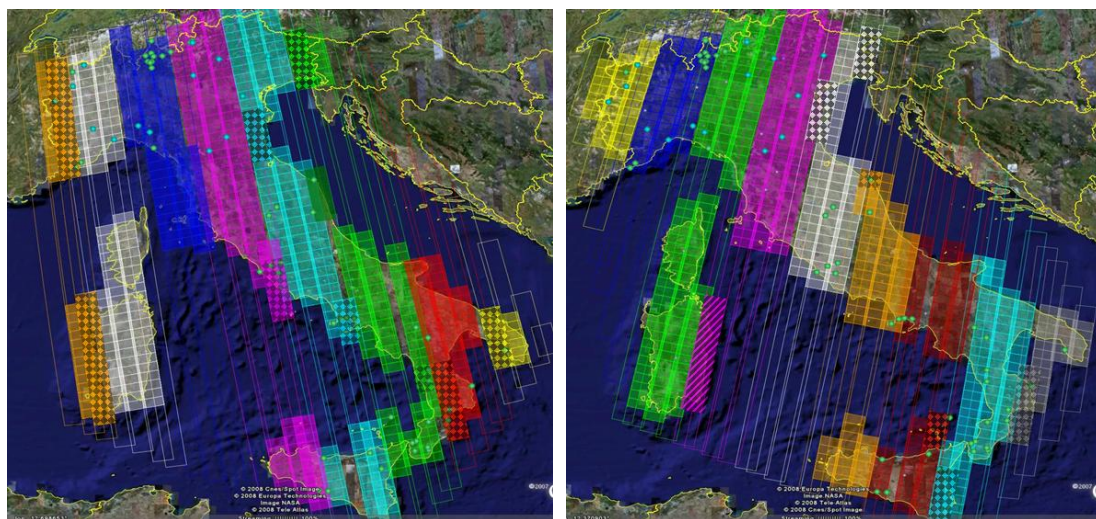


Fig. 125 - Copertura del territorio Italiano con immagini acquisite dalla costellazione COSMO-SkyMed in geometria ascendente (sinistra) e discendente (destra), secondo quanto progettato dal Tavolo tecnico presso il DPC “Linee guida per il piano di acquisizione COSMO-SkyMed per acquisire serie temporali da utilizzare per indagini di tipo interferometrico multi-immagine con finalità di Protezione Civile”. I colori indicano diversi passaggi orbitali dei tre satelliti CSK1, CSK2 e CSK3.

A questo proposito, sono state definite recentemente le linee guida per il piano di acquisizione COSMO-SkyMed finalizzate alla creazione di un archivio di immagini da utilizzare per indagini di tipo multi-interferometrico ed all'attivazione di un sistema di

monitoraggio a scala nazionale a scopo di Protezione Civile. Il principale requisito per la costituzione dell'archivio consiste dunque nella continuità e regolarità delle acquisizioni, sia dal punto di vista temporale, sia nei confronti della geometria di acquisizione. Quest'ultima, infatti, deve essere mantenuta costante nel tempo su ciascuna area, in modo da garantire una continuità e uniformità delle acquisizioni e permettere la costituzione degli archivi multi-interferometrici, sia ascendenti che discendenti, sull'intero territorio nazionale (Fig. 125).

Le diverse sperimentazioni condotte nell'ambito della presente ricerca, hanno mostrato che le tecniche multi-interferogramma, grazie alle caratteristiche di copertura areale, multi-temporalità e precisione delle misure di deformazione che esse sono in grado di fornire, risultano predisposte anche per lo sviluppo di un sistema di sorveglianza satellitare a scala nazionale.

Il principale requisito per l'estensione del controllo alla scala nazionale, riguarda la copertura uniforme e regolare del territorio con dati radar, come discusso in precedenza. Tale necessità implica chiaramente la disponibilità di sistemi in grado di gestire una grande mole di dati e un elevato costo per acquisire ed elaborare le immagini.

Un ulteriore requisito indispensabile per la realizzazione di un servizio di sorveglianza satellitare a scala nazionale, consiste nella disponibilità di dati ancillari (es. DTM, carte geologiche) omogenei sul territorio nazionale. Tale attività risponde al criterio di accessibilità e distribuzione delle informazioni stabilito nell'art. 6 della legge n.225 del 24/02/2004, in merito all'obbligo per le amministrazioni pubbliche di fornire al DPC i dati necessari al perseguimento delle attività di protezione civile. In tale normativa, si evidenzia infatti che la disponibilità di dati di base e tematici costituisce il presupposto fondamentale per assicurare la più agevole e spedita attuazione delle valutazioni ambientali e territoriali, delle analisi e della gestione delle aree a rischio idrogeologico, nonché degli scenari di protezione civile.

Allo scopo di sperimentare l'estendibilità del controllo radar satellitare al territorio nazionale, è attualmente in corso il progetto del Piano Straordinario di Telerilevamento, finanziato dal Ministero per l'Ambiente e la Tutela del Territorio. Tale progetto ha realizzato la copertura dell'intero territorio nazionale con immagini radar satellitari acquisite dai satelliti ERS1/2 ed ENVISAT dell'ESA tra il 1992 e il 2008 e ha visto l'elaborazione di questi dati mediante le tecniche PSInSAR e PSP-DIFSAR rispettivamente (Fig. 126). Questo progetto rappresenta il primo *test* di realizzazione di un servizio di controllo satellitare a scala nazionale e sta consentendo di comprendere e sperimentare le modalità per rispondere ai requisiti prima discussi, evidenziando gli aspetti pratici, tecnici e organizzativi che devono essere riproposti per la creazione del servizio di monitoraggio in 'tempo reale' e a 'scala nazionale'.

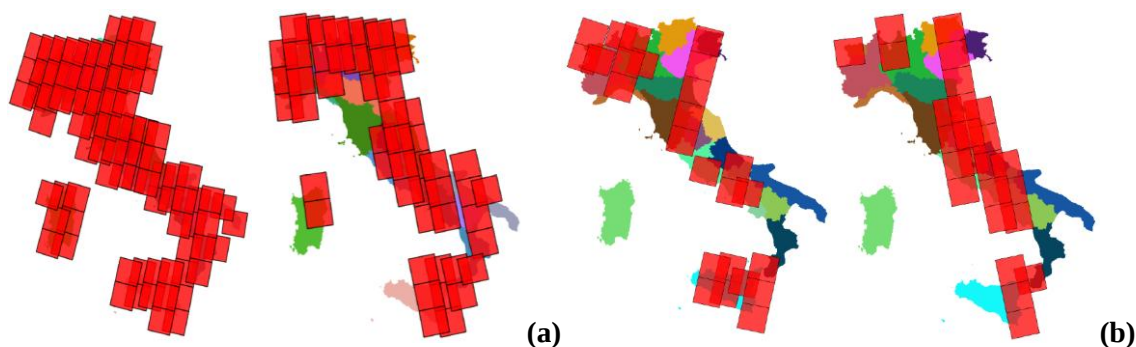


Fig. 126 - Copertura del territorio Italiano con dati (a) ERS 1992-2001 discendenti (sinistra) e ascendenti (destra), e (b) ENVISAT 2003-2008 discendenti (sinistra) e ascendenti (destra), realizzata nell'ambito del progetto PST-A.

Come emerso dai risultati del PST-A, nell'ottica di un monitoraggio a scala nazionale, potrebbe essere utile riferire le misure interferometriche PSI alla rete nazionale di caposaldi GPS dell'IGM, per utilizzare uno stesso sistema di riferimento delle misure su tutto il territorio

nazionale e garantire in tal modo l'agevole confrontabilità e comparabilità dei dati acquisiti su tutto il territorio.

Come discusso nella sezione 5.4, la sorveglianza dei fenomeni di dissesto mediante tecniche radar satellitari, in relazione alle frequenze di acquisizione dei sensori disponibili e alla continuità temporale e multi-temporalità delle riprese, riesce a rientrare nel campo del 'tempo reale', così come definito dalla Dir. P.C.M. del 27 Febbraio 2004. La frequenza di acquisizione mensile (es. 24 giorni per RADARSAT, 35 giorni per ERS ed ENVISAT) risulta comunque piuttosto elevata e impedisce di osservare situazioni ad alto rischio che richiedono una maggiore frequenza di controllo. A questo proposito, l'operatività delle nuove missioni spaziali, quali la costellazione di satelliti italiani COSMO-SkyMed, permette di risolvere in parte tale problematica, migliorando la frequenza di acquisizione sui siti di interesse (16 giorni), consentendo di effettuare un controllo più efficace delle deformazioni, di individuare movimenti precursori e, conseguentemente, di segnalare rapidamente le situazioni di criticità.

Oggi, l'applicabilità delle tecniche alla sorveglianza in tempo reale dei fenomeni di dissesto è inoltre notevolmente condizionata dai tempi complessivi di acquisizione, elaborazione e interpretazione dei dati radar satellitari. Le tempistiche legate a queste attività e le diverse variabili che concorrono a determinarle, sono di seguito analizzate:

- A) Acquisizione dei dati: dal punto di vista operativo, le procedure *standard* di distribuzione dei dati radar satellitari da parte delle diverse agenzie spaziali o delle società di distribuzione, può avvenire secondo differenti modalità, in relazione alle necessità dell'utente.

Esistono dei protocolli tra le agenzie spaziali e le autorità nazionali di protezione civile, come l'*Earth Watching Project* di ESA (<http://earth.esa.int/ew/>) o l'*International Charter on Space and Major Disasters* (<http://www.disasterscharter.org/>), che a seguito di un evento naturale disastroso permettono nell'arco di pochi giorni di trasferire le immagini da satellite alle autorità coinvolte. I protocolli attualmente esistenti sono però concentrati sulle immagini ottiche acquisite prima e dopo l'evento, normalmente utili per la mappatura dei danni indotti dai fenomeni naturali, ma non contemplano il trasferimento di grandi *dataset* di immagini radar per elaborazioni interferometriche.

- B) Elaborazione e aggiornamento delle misure: una volta acquisite e trasferite le immagini, inizia la catena interferometrica che include tutte le elaborazioni, dalla focalizzazione delle immagini fino alla generazione di mappe di spostamento (DInSAR) o dei *dataset* di punti di misura (analisi multi-interferogramma). Il tempo necessario per effettuare questo tipo di analisi dipende da vari fattori tra i quali i più importanti sono rappresentati dal numero di immagini radar da elaborare, l'estensione dell'area da analizzare, la modalità di elaborazione, la capacità di calcolo dei processori utilizzati per le elaborazioni ed i criteri scelti per l'aggiornamento delle misure (strategie di *processing* e frequenza di aggiornamento)

Alcune applicazioni hanno dimostrato che i tempi necessari per effettuare un *processing* PS possono ridursi a un paio di giorni, dalla ricezione del *data stack* di dati SAR alla fornitura delle misure. Inoltre, poiché le nuove missioni spaziali prevedono l'accesso ai dati nell'arco delle 24 ore successive all'acquisizione, si può ipotizzare che in circa 3 giorni dall'ultima acquisizione possa essere consegnato un aggiornamento delle misure.

La frequenza di aggiornamento delle misure satellitari è comunque strettamente connessa ai tempi di rivisitazione dei satelliti sullo stesso sito (cfr. 2.2). Come discusso nella sezione 5.4.1, benché in situazioni di crisi risulti opportuno attuare strategie di aggiornamento del dato con frequenza pari a quella di acquisizione del sensore utilizzato, le esperienze condotte sui siti campione del progetto SAR.net e le sperimentazioni eseguite sui modelli di segnalazione dei *trend* anomali (cfr. 5.4.1.2), hanno mostrato che la selezione di un intervallo di aggiornamento più ampio permette di ricavare un risultato più affidabile e robusto.

- C) Interpretazione geologica: una volta completata l'elaborazione del *dataset* di immagini aggiornato, si attivano le fasi di integrazione con dati ancillari (carte topografiche, foto

aeree o immagini ottiche da satellite ad altissima risoluzione) e di interpretazione geologica.

La tempistica legata a questa fase dipende sia dalla disponibilità di dati ancillari per supportare l'interpretazione delle misure satellitari, sia dai criteri scelti per il confronto tra successivi aggiornamenti finalizzati all'individuazione delle eventuali accelerazioni.

Risulta pertanto evidente la necessità di definire protocolli per la distribuzione rapida dei dati tra le agenzie spaziali e le autorità di protezione civile nazionali e di sviluppare robuste e ben pianificate catene di elaborazione dei dati che includano le modalità e i tempi per l'accesso alle immagini SAR, le elaborazioni interferometriche e la fase di interpretazione geologica. Parte di tali protocolli sono attualmente in fase di sviluppo e sperimentazione nell'ambito del progetto Europeo SAFER.

7 CONCLUSIONI

Le ricerche condotte nell'ambito del presente Dottorato e i diversi casi di studio analizzati hanno permesso di esaminare criticamente le potenzialità e i limiti delle tecniche di interferometria radar satellitare, con particolare riferimento alle applicazioni a supporto dell'attività di controllo dei dissesti geologici e idrogeologici.

La radar-interpretazione ha consentito di eseguire analisi di fenomeni a diverse scale spaziali e temporali (es. mappatura di frane a scala regionale, monitoraggio di un singolo fenomeno a scala locale) rivelandosi uno strumento fondamentale per estrarre informazioni sulla tipologia, l'estensione, le cause e l'evoluzione temporale dei fenomeni analizzati. In particolare, la radar-interpretazione è stata utilizzata quale valido supporto alla gestione del rischio geologico in ambito di interventi di protezione civile e ha così contribuito ad analisi per l'individuazione e inventario dei fenomeni, la caratterizzazione temporale e spaziale, la mappatura rapida e valutazione del rischio residuo, nonché ad analisi dei requisiti e delle potenzialità di un futuro servizio satellitare di monitoraggio e sorveglianza.

Prendendo in esame le diverse tipologie di analisi dei dissesti oggetto di sperimentazione, è possibile riassumere le rispettive potenzialità applicative come di seguito:

- **Individuazione e inventario**

- Individuazione di aree in movimento
- Valutazione dell'estensione dei dissesti
- Verifica o aggiornamento della perimetrazione dei dissesti
- Stima della velocità caratteristica dei fenomeni
- Valutazione dello stato di attività e intensità dei dissesti

- **Caratterizzazione temporale e spaziale**

- Studio dell'evoluzione temporale del fenomeno deformativo
- Identificazione dei movimenti precursori
- Valutazione della risposta nei confronti dei fattori di innesco
- Ricostruzione della geometria del fenomeno
- Confronto spaziale e temporale con dati ancillari
- Valutazione della tipologia e delle cause dei fenomeni

- **Mappatura rapida e valutazione del rischio residuo**

- Mappatura rapida delle aree coinvolte dalle deformazioni
- Mappatura dei danni conseguenti agli eventi di dissesto
- Valutazione della pericolosità e del rischio residui
- Efficacia degli interventi di mitigazione
- Ri-localizzazione degli elementi a rischio

- **Monitoraggio e sorveglianza**

- Monitoraggio remoto delle deformazioni a larga scala e/o a scala locale
- Elevata frequenza di controllo (bi-settimanale o mensile)
- Identificazione di movimenti precursori
- Individuazione di aree e soglie di allerta satellitare
- Possibilità di monitoraggio in 'tempo reale'
- Copertura del monitoraggio a 'scala nazionale'

L'applicabilità delle tecniche interferometriche al controllo dei dissesti è tuttavia attualmente limitata da una serie di fattori, qui schematicamente riassunti:

- Impossibilità di controllare fenomeni a evoluzione rapida: deformazioni che superano i 10-15 cm/anno (per dati in banda C) possono infatti essere equivocate e possono provocare problemi di decorrelazione temporale che riducono o compromettono la qualità dei risultati dell'analisi.
- Difficoltà di ricavare misure di deformazione in presenza di copertura vegetale: la vegetazione riduce la penetrazione del segnale radar al suolo e induce problemi di decorrelazione.
- Relatività delle misure ricavate mediante le tecniche multi-interferogramma: le misure di deformazione vengono riferite alla posizione di un punto di riferimento a terra di coordinate note e possono quindi essere soggette a *offset* indotti dai movimenti cui è soggetto il punto di riferimento stesso. Tali *offset* rappresentano un ostacolo al confronto quantitativo delle misure interferometriche satellitari con i dati rilevati *in situ*.

Attualmente, l'utilizzo dei dati radar satellitari per l'individuazione e inventario dei fenomeni di dissesto, la caratterizzazione temporale e spaziale, nonché la mappatura rapida e valutazione del rischio residuo, rappresenta in Italia uno strumento operativo la cui implementazione è stata ampiamente sperimentata e validata mediante numerosi casi applicativi presenti sul territorio nazionale (es., aree test dei progetti SAR.net, Terrafirma, SAFER).

Al contrario, l'implementazione di un sistema satellitare di monitoraggio e sorveglianza a scala nazionale è attualmente in fase di progettazione e sperimentazione.

La metodologia proposta per lo sviluppo di un sistema satellitare di monitoraggio e sorveglianza si basa sul controllo remoto delle deformazioni superficiali, assunte quali parametri indicatori dell'evoluzione temporale dei fenomeni di dissesto. Le deformazioni, infatti, tra tutti i parametri connessi con i movimenti di versante (es. fattori di innesco, quali precipitazioni e terremoti), rappresentano spesso l'indicatore più immediato da monitorare, per comprendere quale sarà l'evoluzione a breve termine dei fenomeni.

Benché ad oggi le tecniche satellitari multi-interferogramma possiedano notevoli e adeguate potenzialità per il monitoraggio e sorveglianza in tempo reale dei fenomeni di dissesto, sia a scala locale sia a scala nazionale, la loro applicabilità a livello operativo rende necessari i seguenti requisiti:

- Copertura uniforme e regolare del territorio con dati radar satellitari

Le esperienze maturate nel corso degli anni hanno evidenziato che, per offrire un servizio di monitoraggio in tempo reale operativo, è fondamentale la disponibilità di immagini radar satellitari acquisite con regolarità, uniformità e frequenza elevata. Tale circostanza mette in luce l'importanza della programmazione delle strategie di acquisizione delle nuove missioni, quali RADARSAT-2, TerraSAR-X o la costellazione italiana COSMO-SkyMed, per garantire un'adeguata copertura del territorio nazionale con le acquisizioni SAR.

A questo proposito, sono state recentemente definite le linee guida per il piano di acquisizione COSMO-SkyMed, finalizzate alla creazione di un archivio di immagini da utilizzare per indagini di tipo multi-interferometrico, per l'attivazione di un sistema di monitoraggio a scala nazionale a scopi di protezione civile.

Per sperimentare l'estendibilità del controllo radar satellitare al territorio nazionale, è inoltre attualmente in corso il progetto del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A), finalizzato alla copertura dell'intero territorio nazionale con immagini radar satellitari acquisite dai satelliti ERS1/2 ed ENVISAT dell'ESA tra il 1992 e il 2008 ed alla loro elaborazione mediante tecniche multi-interferogramma. Questo progetto rappresenta il primo *test* di realizzazione di un servizio di controllo satellitare a scala nazionale e ha consentito di evidenziare gli aspetti pratici, tecnici e organizzativi che devono essere riproposti in futuro per la creazione del servizio operativo di monitoraggio in tempo reale e a scala nazionale.

- Disponibilità di dati ancillari omogenei

Le tecniche multi-interferometriche risultano predisposte anche per lo sviluppo di un sistema di sorveglianza satellitare a ‘scala nazionale’, ma necessitano della disponibilità di una copertura del territorio nazionale con dati ancillari (es. DTM, carte geologiche) omogenei. Infatti, l’uso di dati satellitari omogenei a scala nazionale, come quelli del PST-A, presuppone necessariamente di disporre di dati ancillari omogenei ai fini della radar-interpretazione.

- Tempi di acquisizione, elaborazione e interpretazione conformi con il ‘tempo reale’

La sorveglianza dei fenomeni di dissesto geologico mediante tecniche radar satellitari, in relazione alle frequenze di acquisizione dei sensori attualmente (o in futuro) disponibili (mensile o settimanale) e alla continuità temporale e multi-temporalità delle riprese, rientra nel campo del ‘tempo reale’ (come definito dalla Dir. P.C.M. del 27/02/2004).

L’applicabilità di tali tecniche alla sorveglianza è tuttavia notevolmente condizionata dai tempi complessivi di acquisizione, elaborazione e interpretazione dei dati radar satellitari. Ciò mette in luce la necessità di definire protocolli per la distribuzione rapida dei dati tra le agenzie spaziali e le autorità di protezione civile nazionali, nonché di sviluppare robuste e ben pianificate catene di elaborazione dei dati che includano le modalità e i tempi per l’accesso alle immagini SAR, le elaborazioni interferometriche e la fase di interpretazione geologica.

BIBLIOGRAFIA

- ACHACHE J., FRUNEAU B., DELACOURT C. (1995) - *Applicability of SAR interferometry for operational monitoring of landslides*. Proc. 2nd ERS Applications Workshop, London, 165-168.
- ALLEMAND P., DELACOURT C., SQUARZONI C. (2003) - *Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR Interferometry*. Engineering Geology 68, 2003.
- ANGELI M., PASUTO A., SILVANO S. (2000) - *A critical review of landslide monitoring experiences*. Engineering Geology 55, 133-147.
- ARNAUD A., ADAM N., HANSEN R., INGLADA J., DURO J., CLOSA J., AND EINEDER M. (2003) - *ASAR ERS interferometric phase continuity*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 21-25 July 2003, Toulouse (France).
- BASILE, G. & COCINA, S. (2006) - Progetto Riscmass. Metodologie per la gestione del rischio frana e dei movimenti del suolo con scenari di politica assicurativa. Il caso di Naro (Ag). Rapporto finale. *Programma Comunitario Interreg IIIb MedOcc*.
- BERARDINO P., COSTANTINI M., FRANCESCHETTI G., IODICE A., PIETRANERA L., RIZZO V. (2003) - *Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy)*. Engineering Geology, 68 (1-2), 31-51.
- BERARDINO P., FORNARO G., LANARI R., SANSOSTI E. (2002) - *A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms*. Trans. of Geoscience and Remote Sensing, 40 (11), 2375-2383.
- BRARDINONI F., SLAYMAKER O., HASSAN M.A. (2003) - *Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data*. Geomorphology 54, 179-196.
- BÜRGMANN R., HILLEY G.E., FERRETTI A. (2006) - *Resolving Vertical Tectonics in the San Francisco Bay Area from Permanent Scatterer InSAR and GPS Analysis*. Geology, 34. Pp.221-224.
- CABRAL-CANO E., ARCINIEGA-CEBALLOS A., DÍAZ-MOLINA O., CIGNA F., OSMANOGLU B., DIXON T., DEMETS C., VERGARA-HUERTA F., GARDUÑO-MONROY V. H., ÁVILA-OLIVERA J. A., HERNÁNDEZ-QUINTERO E. (2010a) - *Is there a tectonic component on the subsidence process in Morelia, Mexico?* Land subsidence, associated hazards and the role of natural resources development, Hydrological Sciences Journal, Red Book Series. K. Prince et al. Ed. pp. 164-169.
- CANUTI P. & FOCARDI P. (1986) - *Slope instability and landslides investigations in Tuscany*. Mem. Soc. Geol. Ital., 31, 307-315.
- CANUTI P., CASAGLI N., CATANI F., FARINA P. (2005a) - *Landslide hazard mapping at a basin scale using remote-sensing data and neural networks*. 4th International Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage. Kyoto (Japan), 15-16 January 2005. International Consortium on Landslides (ICL).
- CANUTI P., CASAGLI N., ERMINI L., FANTI R., FARINA P. (2004) - *Landslide activity as a geoinicator in Italy: significance and new perspectives from remote sensing*. Environmental Geology, vol.45, n.7, pp. 907-919.
- CANUTI P., CASAGLI N., FARINA P., FERRETTI A., MARKS F., MENDUNI G. (2005b) - *Land subsidence in the Arno river basin studied through SAR interferometry*. Proc. of SISOLS 2005, Seventh International Symposium on Land Subsidence. Shanghai, China, 23-28 October 2005, 1, 407-416.
-

- CARNEC C., MASSONNET D., KING C. (1996) - *Two examples of the application of SAR interferometry to sites of small extent*. Geophysical Research Letters 23, 3579-3582.
- CARTER M. & BENTLEY S.P. (1985) - *The geometry of slip surfaces beneath landslides: predictions from surface measurements*. Canadian Geotechnical Journal, 22, 234-238.
- CASAGLI N. & FARINA P. (2006) – *Valutazione delle condizioni di dissesto dell’abitato di Cirò Marina*. Rapporto 2.0. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, 22 Settembre 2006. 46 pp.
- CASAGLI N. & FARINA P. (2007) - *Relazione di sintesi relativa all’analisi dei dati satellitari interferometrici nel Comune di Cirò Marina (Crotone)*. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, 22 Marzo 2007. 2 pp.
- CASAGLI N. (2008) - *Nota relativa alla situazione della frana di Spriana (SO)*, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, 09 Aprile 2008. 6 pp.
- CASAGLI N., CIGNA F., DEL CONTE S., LIGUORI V. (2009a) - *Nuove tecnologie radar per il monitoraggio delle deformazioni superficiali del terreno: casi di studio in Sicilia*. Bollettino dell’Ordine dei Geologi di Sicilia, 3, 17-27.
- CASAGLI N., CIGNA F., GIGLI G., MUGNAI F. (2009b) - *Service Contract for the provision of geotechnical engineering consultancy and project management services in relation with the consolidation of the terrain underlying the bastion walls and historic places of the city of Mdina (Malta)*. Results from the interferometric analysis. ANNEX A (November, 2009).
- CASAGLI N., DEL CONTE S., FARINA P., PROIETTI C. (2008a) - *Analisi dei dissesti nell’area di Roma con dati telerilevati da satellite*. Rapporto n. 2.0. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, Dicembre 2008.
- CASAGLI N., DEL CONTE S., PROIETTI C. (2008b) - *Analisi dei dissesti nell’area di Napoli con dati telerilevati da satellite*. Rapporto n.1.0. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, 22 Settembre 2008.
- CASAGLI N., FARINA P., AGILI F. (2005) - *Controllo satellitare delle deformazioni della frana di Cutigliano*. Rapporto finale. Sancilia S.r.l.. Settembre 2005.
- CASAGLI N., FARINA P., KUKAVICIC M., RIGHINI G. (2004) - *Monitoraggio dei fenomeni franosi in località Castagnola (La Spezia) mediante interferometria SAR satellitare*. Rapporto Finale. Provincia di La Spezia. Settembre 2004.
- CASAGLI N., GIGLI G., FALORNI G., LEONI L., LOMBARDI L., MANZO G., MORELLI S., MUGNAI F. (2008c) - *Service Contract for the provision of geotechnical engineering consultancy and project management services in relation with the consolidation of the terrain underlying the bastion walls and historic places of the city of Mdina (Malta)*. Results from the geological survey. (Aprile 2008).
- CASAGLI N., GUERRI L., FARINA P., RIGHINI G., AGILI F., COLOMBO D., FERRETTI A., FUMAGALLI A. (2006a) - *Analisi di dati telerilevati per l'emergenza connessa alla frana di Cerzeto (CS)*. Rapporto N.6, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, 22 settembre 2006. 165 pp.
- CASAGLI N., RIPEPE M., AGILI F., FALORNI G., FARINA P., GIANNINI L., GUERRI L., HARRIS A., INNOCENTI L., KUKAVICIC M., MARKS F., PAVANELLI N., RIGHINI G., SCADUTO G., VASELLI O. (2006b) - *Servizio di mappatura rapida (rapid mapping) basato su dati satellitari: applicazione al vulcano Merapi*. Rapporto N.1.1, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, 19 Luglio 2006. 61 pp.
- CASAGLI N., COLOMBO D., FERRETTI A., GUERRI L. & RIGHINI G. 2008. Case Study on Local Landslide Risk Management During Crisis by Means of Remote Sensing Data. Proc. First World Landslide Forum, Tokyo, Japan, 125-128.
-

- CASELLA V. & GALETTO R. (1998) – *Tecniche innovative per il rilevamento terrestre, aereo e da satellite*. Atti della 2^a Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 24-27 Novembre 1998, Volume 1.
- CATANI F., FARINA P., MORETTI S., NICO G., STROZZI T. (2005) - *On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass movements*. *Geomorphology*, 66, 119-131.
- CIGNA F. (2007) - *La tecnica Ps-InSAR per lo studio delle condizioni di dissesto nei comuni di Agrigento e Naro*. Tesi di Laurea inedita. Università degli Studi di Palermo, A.A. 2006-2007.
- CIGNA F., BIANCHINI S., RIGHINI G., PROIETTI C., CASAGLI N. (2010a) - *Updating landslide inventory maps in mountain areas by means of Persistent Scatterers Interferometry (PSI) and photo-interpretation: Central Calabria (Italy) case study*. In: Malet, J.-P., Glade, T., Casagli, N. (eds.), *Mountain Risks: Bringing Science to Society* (572 pp.). Proc. of the International Conference, 24-26th November 2010, Florence, Italy. CERIG Editions, Strasbourg, France, pp. 3-9.
- CIGNA F., DEL VENTISETTE C., CASAGLI N., LIGUORI V. (submitted) - *Combining in situ investigations and satellite InSAR 'back monitoring' for the analysis of present-day ground instability in Agrigento (Sicily, Italy)*. Submitted to *Engineering Geology* in January 2011.
- CIGNA F., DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., CASAGLI N. (2010b) - *InSAR time-series analysis for management and mitigation of geological risk in urban area*. In: Proc. IGARSS2010, Hawaii, USA. pp. 1924-1927.
- CIGNA F., DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., CASAGLI N. (under review) - *Advanced radar-interpretation of InSAR time series for mapping and characterization of geological processes*. Submitted to *Natural Hazards and Earth System Sciences* on 26 October 2010. Minor revision requested on 18 December 2010. Manuscript: nhess-2010-371.
- COLESANTI C. & WASOWSKI J. (2004) - *Satellite SAR interferometry for wide-area slope hazard detection and site-specific monitoring of slow landslides*. Proceedings ninth Intern. Symposium on Landslides, June 28-July 2, 2004, Rio de Janeiro, 795-802.
- COLESANTI C., ALLIEVI J., FERRETTI A. (2003a) - *Monitorare fenomeni franosi a partire da dati radar satellitari elaborati con la tecnica dei diffusori permanenti*. *MondoGIS*, Marzo/Aprile 2003, pp 26-30.
- COLESANTI C., FERRETTI A., NOVALI F., PRATI C., ROCCA F. (2003b) - *SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers Technique*. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, 41 (7). pp. 16S5-1701.
- COLESANTI C., FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. (2003c) - *Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique*. *Engineering Geology*, 68 (2003) 3 –14.
- COLESANTI C., LE MOUËLIC S., BENNATI M., RAUCOULES D., CARNEC C., FERRETTI A. (2005) - *Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers Technique – a case study in the east of France*. *International Journal of Remote Sensing*, 26 (1), 201-207.
- COLOMBO A., MALLEN L., PISPICO R., GIANNICO C., BIANCHI M., SAVIO G. (2006) - *Mappatura regionale delle aree monitorabili mediante l'uso della Tecnica PS*. 10^a Conferenza Nazionale ASITA, 14-17 Novembre 2006 - Fiera di Bolzano, Bolzano, pp.1-6.
- COLOMBO D., FARINA P., MORETTI S., NICO G., PRATI C. (2003) - *Land subsidence in the Firenze-Prato-Pistoia basin measured by means of spaceborne SAR interferometry*. Proc. of IGARSS 2003, Toulouse, Francia.
- COMMISSIONE MINISTERIALE (1968). *La frana di Agrigento. Relazione tecnica*. Città spazio, anno 1, nn. 1-2

- COSTANTINI M. & ROSEN P.A. (1999) - *A generalized phase unwrapping approach for sparse data*. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 267– 269.
- COSTANTINI M., IODICE A., MAGNAPANE L., PIETRANERA L. (2000a) - *Monitoring terrain movements by means of sparse SAR differential interferometric measurements*. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HA, USA, pp. 3225– 3227.
- COSTANTINI M., IODICE A., PIETRANERA L. (2000b) - *Temporal analysis of terrain subsidence by means of sparse SAR differential interferometric measurements*. Proceedings of the EOS/SPIE Symposium on Remote Sensing, Conference on SAR Image Analysis, Modelling, and Techniques, Barcelona (Spain), vol. II, pp. 12– 18.
- COTECCHIA, V., FIORILLO, F., PAGLIARULO, R., REINA, A. (1996). *Caratteri geologici della Valle dei Templi (Agrigento)*. 1° Conv. Naz. Geol. Appl. and Ital. Sect. of IAEG, Giardini Naxos (ME), 11-15 Giugno 1995. Geol. Appl. e Idrog. Bari.
- CROSETTO M., CRIPPA B., BIESCAS E., MONSERRAT O., AGUDO M. (2005b) - *State-of-the-Art of Land Deformation Monitoring Using Differential SAR Interferometry*. ISPRS Hannover Workshop 2005. High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information 17-20 May 2005, XXXVI, Part 1/w3.
- CROZIER M.J. (1984) - *Field assessment of slope instability*. Brundsen, D. and Prior, D. (Editors), Slope Instability: John Wiley and Sons, Chichester, 103-140.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) - *Landslide types and processes*. Turner A.K. & Schuster R.L. (Editors), Landslides: Investigation and Mitigation: Sp. Rep. 247, Transportation Research Board, National research Council, National Academy Press, Washington, DC, 36-75.
- CRUDEN D.M. (1986) - *The geometry of slip surfaces beneath landslides: predictions from surface measurements: Discussion*. Canadian Geotechnical Journal, 23, 94.
- DABBAGH A.E., AL-HINAI K.G., GARDNER W.C., KHAN M.A., TAWFIQ M.A. (1996) - *Geologic and hydrologic studies of Saudi Arabia under the Shuttle Imaging Radar-C (SIR-C) science plan*. Science Results from the Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR): Progress Report, Jet Propulsion Laboratory Publication No. 96-7, April 1996, pp. 15-31.
- Dir. P.C.M. - 27 Febbraio 2004 - *Indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del sistema di allertamento nazionale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile*.
- DURO J., INGLADA J., CLOSA J., ADAM N., ARNAUD A. (2003) - *High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data*. Fringe 2003, 1-5 December 2003, Frascati (Italy).
- FARINA P., AVILA-OLIVERA A.J. & GARDUÑO-MONROY V.H., 2007 - *Structurally-controlled Urban Subsidence along the Mexican Volcanic Belt (MVB) monitored by InSAR*. Envisat Symposium 2007. Montreux, Switzerland, 23-27 April 2007. ESA, CD-ROM.
- FARINA P., CASAGLI N., FERRETTI A. (2008) - *Radar-interpretation of InSAR measurements for landslide investigations in civil protection practices*. First North American Landslide Conference, June 3-8, 2007. Vail, Colorado.
- FARINA P., COLOMBO D., FUMAGALLI A., GONTIER E., MORETTI S. (2003) - *Integration of Permanent Scatterers Analysis and High Resolution Optical Images within Landslide Risk Analysis*. FRINGE 2003 – 1/5 Dicembre 2003 – Frascati, pp 1-8.
-

- FARINA P., COLOMBO D., FUMAGALLI A., MARKS F., MORETTI S. (2006) - *Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project*. Engineering Geology, v. 88, p.200-217.
- FERRETTI A., FERRUCCI F., PRATI C., ROCCA F. (2000a) - *SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique*. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International. Vol.7, Issue 2000, pp 3219 – 3221.
- FERRETTI A., FOSSATI D., LAFFI R., PRATI C. (2003) - *Tecnologie innovative di telerilevamento satellitare per la gestione del territorio*. Settima Conferenza Nazionale delle Agenzie Ambientali; Milano, Novembre 2003. 10 pp.
- FERRETTI A., MONTI-GUARNIERI A., PRATI C., ROCCA F. (1998) - *Multi-image DEM Reconstruction*. Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International. Vol. 3, pp. 1367-1369.
- FERRETTI A., NOVALI F., BÜRGMANN R., HILLEY G., PRATI C. (2004) - *InSAR Permanent Scatterer Analysis Reveals Ups and Downs in San Francisco Bay Area*. EOS, Vol. 85, N. 34, 2004; pages 317-324.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. (2000b) - *Measuring Subsidence with SAR Interferometry: Applications of the Permanent Scatterers Technique*. Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence, Vol. II, SISOLS2000, 24-29 Settembre 2000, Ravenna, pp. 67-79.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. (2000c) - *Non-linear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR interferometry*. Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 38 (5), 2202-2212.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. (2001) - *Permanent Scatterers in SAR interferometry*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 39 (1), 8–20.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F., CASAGLI N., FARINA P., YOUNG, B. (2005) - *Permanent Scatterers technology: a powerful state of the art tool for historic and future monitoring of landslides and other terrain instability phenomena*. Proc. of 2005 International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada.
- FIORILLO F. (1999). *Assetto stratigrafico e strutturale dei terreni nella Valle dei Templi (Agrigento)*. Boll. Soc. Geol. It. 118. 601-609.
- FORNARO G., FRANCESCHETTI G., LANARI R. (1996) - *Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 34, pp. 720-727.
- FRUNEAU B., ACHACHE J., DELANCOURT C. (1996) - *Observation and modeling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry*. Tectophysics 265, 181-190.
- GARDUÑO-MONROY V.H., ARREYGUE-ROCHA E., ISRADEALCÁNTARA I. Y RODRÍGUEZ-TORRES G. M. (2001). *Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 18 (1), 37-54.
- GHIGLIA D.C. & ROMERO L.A. (1994) - *Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods*. J. Opt. Soc. Amer. A, Vol. 11, n. 1, pp. 107-117.
- GHIGLIA D.C., MASTIN G., ROMERO L. (1987) - *Cellular automata method for phase unwrapping*. J. Opt. Soc. Amer., Vol. 4, pp. 267-280.
- GILI J.A., COROMINAS J., RIUS J. (2000) - *Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring*. Engineering Geology 55, 167-192.

- GOLDSTEIN R.M., ENGELHARDT H., KAMB B., FROLICH. R.M. (1993) - *Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream*. Science, 262 (5139), 1525-1530.
- HERRERA, G., DAVALILLO, J.C., COOKSLEY, G., MONSERRAT, O. & PANCIOLO, V. (2009) - *Mapping and monitoring geomorphological processes in mountainous areas using PSI data: Central Pyrenees case study*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9: 1587-1598.
- HERVAS J., BARREDO J., ROSIN P.L., PASUTO A., MANTOVANI F., SILVANO S. (2003) - *Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy*. Geomorphology, 54, 63-75.
- HILLEY G.E, BURGMANN R., FERRETTI A., NOVALI F., ROCCA F. (2004) - *Dynamics of slow-moving landslides from Permanent Scatterer analysis*. Science, 304 (5679), 1952-1955
- HOOPER A., ZEBKER H., SEGALL P., KAMPES B. (2004) - *A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers*. Geophys. Res. Lett., 31(23), 5, 2004.
- IOVINE, G., PETRUCCI, O., RIZZO, V. & TANSI, C. (2006) - *The March 7th, 2005 Cavallerizzo (Cierzeto) landslide in Calabria - Southern Italy*. IAEG 2006, Paper n. 785.
- IUGS/WGL (1995) - *A suggested method for describing the rate of movement of a landslide*. IAEG Bull., 52: 75-78.
- JÖNSSON S., ADAM N., BJÖRNSSON H. (1998) - *Effects of subglacial geothermal activity observed by satellite radar interferometry*. Geophysical Research Letters 1998, vol. 25, n°7, pp. 1059-1062.
- KAAB A. (2000) - *Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: new techniques and applications*. Physics and Chemistry of the Earth, 25 (9), 765-770.
- KIMURA H. & YAMAGUCHI Y. (2000) - *Detection of landslide areas using radar interferometry*. Phot. Eng.& Remote Sensing, 66(3), 337-344.
- LANARI R., LUNDGREN P., MANZO M., CASU F. (2005) - *Satellite radar interferometry time series analysis of surface deformations for Los Angeles, California*. Geophys. Res. Lett., 31, L23613, DOI: 10.1029/2004GL021294.
- LILLESAND T.M. & KIEFER R.W. (1987) - *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley and Sons, 1987.
- LUNDGREN P., CASU F., MANZO M., PEPE A., SANSOSTI E., LANARI R. (2004) - *Gravity and magma induced spreading of Mount Etna volcano revealed by satellite radar Interferometry*. Geophys. Res. Lett., 31(4).
- MASSONET D., BRIOLE P., ARNAUD A. (1995) - *New insights on Mount Etna from 18 months of radar interferometric monitoring*. Nature 375, pp.567-570.
- MASSONET D., FEIGL K., ROSSI M., ADRAGNA F. (1994) - *Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake*. Nature, 369, 227-230.
- MASSONET D., Holzer T., Vadon H. (1997) - *Land Subsidence Caused by the East Mesa Geothermal Field, California, Observed Using SAR Interferometry*. Geophysical Research Letters, vol. 24, n.8, pp. 901-904.
- MASSONNET D. & FEIGL K.L. (1998) - *Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface*. Rev. Geophys., 36. 441-500.
- McKEAN J. & ROERING J. (2004) - *Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry*. Geomorphology, 57, 331-351.
- MORA O., MALLORQUI J., BROQUETAS A. (2003) - *Linear and non-linear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images*. IEEE Trans. on Geoscience and
-

- Remote Sensing, 41 (10), 2243-2253.
- MOTTA S. (1957). *Nota descrittiva geologica della tavoletta «Agrigento» (271-IV NE), con particolare esame della serie gessoso-solfifera in essa esistente*. Boll. Serv. Geol. It., vol. LXXVIII. fasc. IV-V, pagg. 519-567.
- MUSSON R.M.W., HAYNES M., FERRETTI A. (2004) - *Space-based tectoning modelling in subduction areas using PSInSAR*. Seismological Research Letters, 75 (5), 598-606.
- PANCIOLI V. & CASAGLI N. (2008) - *Updating of a landslide inventory map through InSAR techniques: outcomes from ESA - Terrafirma project*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-03703, EGU General Assembly 2008.
- PANCIOLI V. & FARINA P. (2007) - *Terrafirma Landslide Work in Italy*. 2007 International Geohazards Week, ESA/ESRIN, Frascati (Italy), 5-9 November 2007.
- PANCIOLI V., RAETZO, H., CAMPOLMI, T. & CASAGLI, N. (2008) - *Terrafirma Landslide Services for Europe based on Space-borne InSAR Data*. Proc. First World Landslide Forum, Tokyo, Japan, 81-84.
- PEPE A., SANSOSTI E., BERARDINO P., LANARI R. (2005) - *On the generation of ERS/Envisat DInSAR time series via the SBAS technique*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2 (3), 265-269.
- PRATI C. & FERRETTI A. (2007b) - *Rapporto di elaborazione dataset discendente Cirò Marina*. Politecnico di Milano, 26 Gennaio 2007. 8 pp.
- PRITT M.D. (1996) - *Phase unwrapping by means of multigrad techniques for interferometric SAR*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 34, pp. 728-738.
- RIGHINI G., DEL VENTISETTE C., CASAGLI N., LOMBARDI L. (2008) - *Updating a landslide inventory map with remote sensing data*. Geophysical Research Abstracts, vol. 10, EGU2008, Vienna 13-18 April 2008.
- RIZZO V. & TESAURO M. (2000) - *SAR Interferometry and Field Data of Randazzo Landslide (Eastern Sicily, Italy)*. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, Volume 25, Issue 9.
- ROSEN P.A., HENSLEY S., JOUGHIN I.R., LI F.K., MADSEN S.N., RODRIGUEZ E., GOLDSTEIN R.M. (2000) - *Synthetic aperture radar interferometry*. Proc. IEEE, 88 (3). 333-382.
- ROTT H., SCHEUCHEL B., SIEGEL A. (1999) - *Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: A case study from mass waste above a reservoir in the Otztal Alps, Austria*. Geophysical Research Letters 26(11), 1629-1632.
- ROTT H., SIEGEL A. (1999) - *Analysis of Mass Movements in Alpine Terrain by Means of SAR Interferometry*. Proc. IGARSS'99, Hamburg, 1993-1939.
- RUGGIERI G. & GRECO A. (1966) - *Distribuzione dei macrofossili nel Calabrian Inferiore di Agrigento*. Atti Acc. Gioenia Sc. Nat., Catania, serie VI, 18, 319-327.
- SALVI S., ATZORI S., TOLOMEI C., ALLIEVI J., FERRETTI A., ROCCA F., PRATI C., STRAMONDO S., FEUILLET N. (2004) - *Inflation rate of the Colli Albani volcanic complex retrieved by the permanent scatterers SAR interferometry technique*. Geophysical Research Letters, 31, 1-4.
- SINGHROY V. & MOLCH K. (2004) - *Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques*. Advances in Space Research, 33, 290-295.
- SLAM (2005) - *Manuale dei prodotti SLAM. Mappatura di eventi franosi, Monitoraggio di movimenti franosi, Mappatura della suscettibilità da frana, Esempi di utilizzo*. Pkt108-269-2.0.
- SOETERS R. & VAN WESTEN C.J. (1996) - *Slope instability recognition, analysis and zonation*. Turner A.K. and Schuster R.L. (eds.), Landslides: Investigation and Mitigation: Sp. Rep. 247,

Transportation Research Board, National research Council, National Academy Press, Washington, DC, 129-177.

STROZZI T., FARINA P., CORSINI A., AMBROSI C., THÜRING M., ZILGER J., WIESMANN A., WEGMÜLLER U., WERNER C. (2005) - *Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry*. Landslides, 2 (3), 193-201.

STROZZI T., WEGMULLER U., KEUSEN H.R., GRAF K., WIESMANN A. (2006) - *Analysis of the terrain displacement along a funicular by SAR interferometry*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, January 2006, vol. 3, no. 1, pp.15-18.

TRE, TELE-RILEVAMENTO EUROPA S.R.L. (2008a) - *Monitorare il Territorio da Satellite. Interferometria SAR Satellitare e Tecnica dei Permanent Scatterers*. Materiale didattico del corso di formazione. 8-9 Aprile 2008.

TRE, TELE-RILEVAMENTO EUROPA S.R.L. (2008b) - *PSInSAR – Manuale d'uso*. Gennaio 2008. 84 pp.

VAN DIJK, J.P., BELLO, M., BRANCALEONI, G.P., CANTARELLA, G., COSTA, V., FRIXA, A., GOLFETTO, F., MERLINI, S., RIVA, M., TORRICELLI, S., TOSCANO, C. & ZERILLI, A. 2000. *A regional structural model for the northern sector of the Calabrian Arc (Southern Italy)*. Tectonophysics 324: 267-320.

WALKER G. (1931) - *On Periodicity in Series of Related Terms*. Proc. of the Royal Society of London, Ser. A, Vol. 131, (1931) 518-532.

WASOWSKI J., D. CASARANO, C. LAMANNA, F. BOVENGA, D. CONTE, R. NUTRICATO, P. BERARDINO, M. MANZO, A. PEPE, G. ZENI, R. LANARI, A. REFICE (2007) - *A comparative analysis of DInSAR results achieved by the SBAS and SPINUA techniques: the Maratea valley case study, Italy*. Proc. 'Envisat Symposium 2007', Montreux, Switzerland 23–27 April 2007 (ESA SP-636, July 2007).

WEGMULLER U., WERNER C., STROZZI T., WIESMANN A. (2004) - *Monitoring mining induced surface deformations*. Proc. Of IGARSS 2004, Anchorage (USA), Settembre 2004.

WEGMULLER U., WERNER C., STROZZI T., WIESMANN A. (2005) - *ERS-ASAR integration in the interferometric point target analysis*. FRINGE 2005 Workshop, ESA ESRIN, Frascati, Italy, 28 Nov. – 2 Dec. 2005.

WEGMULLER U., WERNER C., STROZZI T., WIESMANN A. (2006) - *Application of SAR interferometric techniques for surface deformation monitoring*. 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006.

WERNER C., WEGMULLER U., STROZZI T., WIESMANN A. (2003a) - *Interferometric Point Target Analysis for deformation mapping*. Proc. of IGARSS 2003, Toulouse (Francia), Luglio 2003.

WERNER C., WEGMULLER U., STROZZI T., WIESMANN A. (2003b) - *Interferometric Point Target Analysis with JERS L-band data*. Proc. of IGARSS 2003, Toulouse (Francia), Luglio 2003.

WIECZOREK G.F. (1984) - *Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction*. IAEG Bull., 21 (3), 337-342.

YULE G.U. (1927) - *On a Method of Investigating Periodicities in Disturbed Series, with Special Reference to Wolfer's Sunspot Numbers*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Ser. A, Vol. 226, (1927) 267-298.

ALLEGATI

Articoli su riviste internazionali

- **CIGNA F.**, DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., CASAGLI N. (under review) - *Advanced radar-interpretation of InSAR time series for mapping and characterization of geological processes*. Submitted to Natural Hazards and Earth System Sciences on 26 October 2010. Minor revision requested on 18 December 2010. Manuscript: nhess-2010-371.
- **CIGNA F.**, DEL VENTISETTE C., CASAGLI N., LIGUORI V. (submitted) - *Combining in situ investigations and satellite InSAR 'back monitoring' for the analysis of present-day ground instability in Agrigento (Sicily, Italy)*. Submitted to Engineering Geology in January 2011.

Articoli su riviste nazionali

- CASAGLI N., **CIGNA F.**, DEL CONTE S., LIGUORI V. (2009a) - *Nuove tecnologie radar per il monitoraggio delle deformazioni superficiali del terreno: casi di studio in Sicilia*. Geologi di Sicilia, Anno XVII, vol.3, 17-27.

Capitoli di libro e proceedings

- **CIGNA F.**, BIANCHINI S., RIGHINI G., PROIETTI C., CASAGLI N. (2010a) - *Updating landslide inventory maps in mountain areas by means of Persistent Scatterers Interferometry (PSI) and photo-interpretation: Central Calabria (Italy) case study*. In: Malet, J.-P., Glade, T., Casagli, N. (eds.), Mountain Risks: Bringing Science to Society (572 pp.). Proc. of the International Conference, 24-26th November 2010, Florence, Italy. CERG Editions, Strasbourg, France, pp. 3-9.
- **CIGNA F.**, DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., CASAGLI N. (2010b) - *InSAR time-series analysis for management and mitigation of geological risk in urban area*. In: Proc. IGARSS2010, Hawaii, USA. pp. 1924-1927.
- CABRAL-CANO E., ARCINIEGA-CEBALLOS A., DÍAZ-MOLINA O., **CIGNA F.**, OSMANOGLU B., DIXON T., DEMETS C., VERGARA-HUERTA F., GARDUÑO-MONROY V. H., ÁVILA-OLIVERA J. A., HERNÁNDEZ-QUINTERO E. (2010a) - *Is there a tectonic component on the subsidence process in Morelia, Mexico?* Land subsidence, associated hazards and the role of natural resources development, Hydrological Sciences Journal, Red Book Series. D. Carreón-Freyre et al. Eds. pp. 164-169.
- CABRAL-CANO E., OSMANOGLU B., DIXON T., WADOWINSKI S., DEMETS C., **CIGNA F.**, DÍAZ-MOLINA O. (2010b) - *Subsidence and fault hazard maps using PSInSAR and permanent GPS networks in central Mexico*. Land subsidence, associated hazards and the role of natural resources development, Hydrological Sciences Journal, Red Book Series. D. Carreón-Freyre et al. Eds. pp. 255-259.

Abstracts

- **CIGNA F.**, DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., CASAGLI N. (2010c) - *Landslide detection and long-term monitoring in urban area by means of advanced interferometric techniques*. EGU General Assembly 2010. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-14368, 2010.
- RIGHINI G., DEL CONTE S., **CIGNA F.**, CASAGLI N. (2010) - *Slope instability mapping around L'Aquila (Abruzzo, Italy) with Persistent Scatterers Interferometry from ERS, ENVISAT and RADARSAT datasets*. EGU General Assembly 2010. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-3980, 2010.
- DEL CONTE S., RIGHINI G., **CIGNA F.** (2010) - *Mappatura delle instabilità di versante nei dintorni di L'Aquila tramite dati multi-interferometrici ERS, ENVISAT e RADARSAT*. VIII Convegno dei Giovani Ricercatori di Geologia Applicata. Perugia, February 18th-19th, 2010.
- PANCIOLO V., LU P., CATANI F., **CIGNA F.** (2009) - *PS-InSAR time series analysis as a tool for measuring landslide dynamics*. EGU General Assembly 2009. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-13900, 2009.
- CASAGLI N., **CIGNA F.**, DEL VENTISETTE C., LIGUORI V., MANNO G. (2008) - *Detection and monitoring of ground deformation in urban areas with advanced multi-interferogram techniques*. 33° International Geological Congress, Oslo. August 6-14th, 2008.