



1506
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI URBINO
CARLO BO

DIPARTIMENTO DI SCIENZE PURE ED APPLICATE (DiSPeA)

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DI BASE E APPLICAZIONI

Curriculum – Scienze della Terra

XXXII CICLO - Progetto EUREKA

IL TELERILEVAMENTO SATELLITARE PER LA VALUTAZIONE DEI RISCHI GEOLOGICI LUNGO LE INFRASTRUTTURE LINEARI

Settore Scientifico Disciplinare: GEO/03, GEO/04, GEO/05.

RELATORE

Chiar.mo Prof. MARCO MENICHETTI

CORRELATORE

Dott. GUIDO GUIDOTTI

DOTTORANDO

Dott. MATTEO ROCCEGGIANI

ANNO ACCADEMICO 2018/2019

INDICE

RIASSUNTO.....	I
1. INTRODUZIONE.....	1
1.1. Le infrastrutture lineari e i rischi geologici.....	2
1.2. Struttura della tesi.....	5
2. INTERFEROMETRIA SATELLITARE.....	6
2.1. Introduzione.....	6
2.2. Principi.....	11
2.3. D-InSAR.....	14
2.4. A-DInSAR.....	18
3. TETTONICA ATTIVA.....	22
3.1. L'utilizzo dell'interferometria satellitare per la caratterizzazione di aree tettonicamente attive e il rilevamento preliminare della fratturazione cosismica.....	23
3.1.1. Introduzione.....	23
3.1.2. Materiale e metodi.....	24
3.1.2.1. Analisi D-InSAR.....	24
3.1.2.2. Analisi MT-InSAR.....	27
3.1.3. La sequenza sismica in Italia centrale del 2016/2017.....	30
3.1.4. Il terremoto etneo del 26 dicembre 2018.....	40
3.1.5. Discussione e conclusioni.....	49
4. SUBSIDENZA INDOTTA.....	50
4.1. Trivellazione orizzontale controllata (TOC) in area urbana: analisi PSI.....	51
4.1.1. Introduzione.....	51
4.1.2. Area di studio.....	52
4.1.3. Dataset e metodi.....	53
4.1.4. Risultati e discussione.....	54
4.1.5. Conclusioni.....	56
4.2. Detection and Monitoring of Tunnelling Induced Ground Movements Using Sentinel-1 SAR interferometry.....	57
4.2.1. Abstract.....	57
4.2.2. Introduction.....	57
4.2.3. Area of Interest and Geological Setting.....	60

4.2.4. Dataset and Methodology	63
4.2.5. Results and Discussion	65
4.2.6. Conclusions	72
5. MOVIMENTI FRANOSI	74
5.1. L'utilizzo dell'interferometria per lo screening preliminare della franosità in aree vaste	75
5.1.1 Introduzione.....	75
5.1.2. Obiettivi e metodi	75
5.1.3. Risultati	78
5.1.4. Discussione e conclusioni	84
6. DISCUSSIONE GENERALE E CONCLUSIONI.....	85
Bibliografia.....	90

RIASSUNTO

Il tracciato di un'infrastruttura lineare può interessare ambiti territoriali anche per diverse centinaia di chilometri, attraversando aree geologicamente complesse. Per questo motivo, la progettazione e la realizzazione di un'infrastruttura non possono prescindere da un'analisi attenta dei rischi geologici e dei numerosi elementi che lo compongono (geohazard), nonché dell'interazione che tale struttura può avere con il territorio.

La necessità di soluzioni efficaci e rapide per l'analisi e il monitoraggio di particolari fenomeni geologici può trovare nell'applicazione di moderne tecniche di telerilevamento una valida risposta mantenendo un buon rapporto costi/benefici. In particolare, negli ultimi decenni l'interferometria differenziale radar da piattaforma satellitare o D-InSAR (*Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*) è una delle tecniche più recenti utilizzate per l'individuazione e la misurazione delle deformazioni della superficie terrestre prodotte da eventi naturali e/o antropici.

Negli ultimi anni in particolare, grazie alle missioni Sentinel-1, l'utilizzo dei dati radar può estendersi da un ambito prettamente di ricerca o specialistico, ad un uso più operativo per l'individuazione e il monitoraggio dei rischi naturali, ad integrazione delle tecniche convenzionali.

Nella trattazione vengono introdotti i principali ambiti di utilizzo dell'interferometria satellitare nell'analisi dei rischi geologici e i concetti fondamentali dell'interferometria radar da satellite e le tecniche maggiormente utilizzate. Questo avviene attraverso la presentazione di alcuni casi studio, che presentano, più o meno direttamente, affinità con le problematiche riscontrabili durante le fasi di progettazione, costruzione o esercizio di una infrastruttura lineare.

Una prima parte è dedicata all'utilizzo dell'InSAR per l'analisi delle deformazioni del terreno prodotte da forti eventi sismici e dalla tettonica attiva. Nell'ottica della caratterizzazione di un'area soggetta a questo tipo di eventi vengono presentate delle metodologie di rilevamento delle fratture cosismiche tramite tecniche D-InSAR, opportunamente validate sul terreno. Inoltre, sono presentati alcuni risultati relativi ad analisi multi-temporali per l'individuazione delle deformazioni asismiche. Nella seconda parte invece viene affrontato l'utilizzo del telerilevamento SAR satellitare per il monitoraggio dei fenomeni indotti dalla costruzione di un'opera in sotterraneo sull'ambiente e le strutture circostanti. Questo sia nell'ottica di escludere possibili deformazioni precedenti, sia nel poter monitorare, o valutare a posteriori, quella che possa essere stata, per esempio, l'effettiva subsidenza indotta. Nell'ultima parte della

trattazione vengono valutate le performances sull'utilizzo delle tecniche interferometriche per la caratterizzazione di frane e per lo screening preliminare del *geohazard* su aree vaste. Viene presentato, e validato con i dati disponibili, un metodo per affrontare il problema della mancanza di riflettori in aree rurali poco densamente edificate.

Con le considerazioni emerse dalla valutazione critica dei risultati ottenuti nelle varie applicazioni, vengono sia confermate e messe in luce alcune delle numerose aspettative relative alle potenzialità del dato SAR per la valutazione rapida dei rischi geologici lungo le infrastrutture lineari sia descritti i limiti di applicazione. L'InSAR è una metodologia promettente che può essere implementata molto rapidamente in ogni fase della vita di un'opera, dall'analisi di fattibilità fino alla sua dismissione.

1. INTRODUZIONE

La necessità di soluzioni efficaci e rapide per l'analisi e il monitoraggio di particolari fenomeni geologici può trovare nell'applicazione di moderne tecniche di telerilevamento una valida risposta mantenendo un buon rapporto costi/benefici. In particolare, negli ultimi decenni, l'interferometria differenziale radar da piattaforma satellitare o D-InSAR (*Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*) è una delle tecniche più recenti utilizzate per l'individuazione e la misurazione delle deformazioni della superficie terrestre prodotte da eventi naturali e/o antropici. La tecnica D-InSAR consiste nell'elaborazione di due immagini radar, acquisite con geometrie di ripresa simili in tempi successivi. Attraverso la misura della variazione della fase della radiazione retro-riflessa è possibile ricostruire l'intensità cumulata degli spostamenti avvenuti nel periodo compreso tra le due acquisizioni. La tecnica D-InSAR è stata impiegata con successo nella stima degli spostamenti della crosta terrestre indotti da terremoti, nella misura degli effetti prodotti da subsidenza, versanti instabili e dalla risalita del magma nei vulcani. L'incremento del numero di missioni spaziali dedicate al telerilevamento radar e la conseguente disponibilità di un gran numero di immagini, le prime risalenti al 1992, ha permesso di sviluppare tecniche più sofisticate, denominate A-DInSAR (*Advanced Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*), che hanno consentito di superare alcune limitazioni dell'applicazione dell'approccio originale e di ottenere risultati migliori in termini di risoluzione e di precisione. Queste tecniche, attraverso l'elaborazione di un congruo numero di immagini radar (in genere più di 20), sono in grado di produrre mappe di deformazione dell'area telerilevata e, attraverso la misura degli spostamenti cumulati tra le successive riprese, di ricostruire le relative serie temporali che caratterizzano i fenomeni oggetto di studio. La disponibilità delle immagini acquisite dalla nuova generazione di satelliti Sentinel-1 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) sta rappresentando dal 2015 un grande stimolo per la ricerca e lo sviluppo di nuove possibili applicazioni delle tecniche A-DInSAR. L'interferometria satellitare risulta essere particolarmente promettente per l'analisi e il monitoraggio dei rischi geologici che interagiscono con elementi tanto importanti dal punto di vista economico e sociale, quanto a volte fragili, quali possono essere le infrastrutture lineari (pipelines, tunnel, ferrovie...). L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quindi quello di valutare le potenzialità offerte da questa nuova generazione di satelliti per la valutazione dei rischi geologici nelle fasi di fattibilità e progettazione delle infrastrutture lineari, verificando l'odierna disponibilità di dati e l'esistenza di strumenti efficaci di analisi.

Si ritiene che la ricerca proposta, basata su innovative tecniche di telerilevamento, possa essere un utile strumento per valutare le pericolosità geologiche, quali per esempio fenomeni franosi o deformazioni superficiali legate a fagliazione attiva, anche su vasti areali e in aree remote e difficilmente raggiungibili. Questo nell'ottica di una notevole riduzione dei costi e dei tempi di esecuzione.

1.2. Le infrastrutture lineari e i rischi geologici

In ingegneria con il termine infrastruttura si indica l'insieme delle parti necessarie ad articolare un ambiente per adeguarlo a particolari esigenze. In senso più ampio, nel linguaggio comune, può indicare tutto quell'insieme di opere pubbliche che costituiscono la base dello sviluppo economico e sociale di un paese. A seconda della disposizione sul territorio troviamo infrastrutture puntuali e infrastrutture lineari. Quest'ultime, compongono una rete di impianti e servizi interconnessi tra loro da specifici punti nodali. Per sua natura, questo tipo di infrastrutture necessitano di raggiungere vaste zone di territorio. Tra queste troviamo le infrastrutture di trasporto, costituite dall'insieme dei sistemi e delle opere civili idonei e necessari all'esercizio di un modo di trasporto che si svolge su un determinato territorio. Queste possono essere distinte in:

- Infrastrutture stradali, che includono i sistemi autostradali, le strade di grande comunicazione, la viabilità regionale e comunale;
- Infrastrutture ferroviarie, composte dalle reti nazionali, dalle ferrovie locali e dalle reti metropolitane;
- Infrastrutture di trasporto energetico, composte da gasdotti, oleodotti, acquedotti ed elettrodotti.

Il tracciato di un'infrastruttura lineare può interessare ambiti territoriali anche per diverse centinaia di chilometri, attraversando aree geologicamente complesse e differenti tra loro. Per questo motivo la progettazione e la realizzazione di un'infrastruttura non possono prescindere da un'analisi attenta delle variabili di rischio geologiche (*geohazard*) ma anche delle potenziali interazioni che tale struttura può avere con il territorio. L'analisi dei rischi permette di valutare attentamente la fattibilità di un'opera e definirne le politiche di gestione.

Con il termine "*geohazard*" si indica una condizione della superficie terrestre o un evento di carattere geologico, idrogeologico o geomorfologico che costituisce una minaccia per gli esseri umani o le loro attività (Doornkamp, 1989). La causa del pericolo può essere naturale o antropogenica. Un pericolo esistente può essere riattivato o aggravato dall'attività umana.

Nel contesto delle infrastrutture lineari un rischio geologico può essere ulteriormente definito come segue: una qualsiasi caratteristica o processo fisico geologico o idrogeologico che costituisce una minaccia durante la costruzione (o il funzionamento) o che abbia il potenziale per svilupparsi ulteriormente in una situazione che possa portare a danni o rischi incontrollati.

Nella selezione progettuale del tracciato per delle infrastrutture lineari, come strade, ferrovie o pipeline, oppure nel monitoraggio delle le opere in costruzione o già in essere, i rischi geologici sono comunemente suddivisi in tre grandi categorie (Porter et al. 2002, 2004; Porter & Savigny, 2002; Savigny et al. 2004):

- Rischi derivanti da processi tettonici/geologici;
- Rischi di natura geotecnica;
- Rischi geomorfologici/idrologici.

Nel primo gruppo vengono inserite le criticità dovute ai processi geologici come il *creep* asismico, le rotture cosismiche, gli tsunami, le eruzioni vulcaniche e la liquefazione del suolo. Sebbene rari, producono spesso un vasto impatto areale, causando danni molteplici, sia direttamente che indirettamente, poiché spesso causa scatenante di pericolosi fenomeni secondari, di tipo geotecnico o idrologico. Di conseguenza, il contributo dei rischi tettonici al rischio complessivo può comunque essere significativo e non va sottovalutato. I problemi di natura geotecnica invece includono il rischio frana, la subsidenza e il rigonfiamento del suolo. Fattori comuni di innesco sono l'intensità e la durata delle precipitazioni, variazioni riguardanti le acque sotterranee, l'erosione ecc. Infine, nei rischi geomorfologici/idrologici sono inseriti fenomeni pericolosi come le alluvioni, o altri legati ai fiumi e all'erosione.

Tra queste, le quattro pericolosità dominanti che possono incidere negativamente sull'integrità delle infrastrutture lineari sono terremoti, le frane, i cedimenti del terreno e le inondazioni. Tuttavia, quest'ultime possono essere monitorate solamente con l'interpretazione delle immagini radar ma non con l'interferometria satellitare. Per questo motivo il rischio alluvioni non verrà trattato nei prossimi capitoli. Infatti, l'identificazione e la caratterizzazione dei rischi geologici attraverso l'utilizzo delle tecniche interferometriche lungo un tracciato sono gli obiettivi chiave di questo lavoro di ricerca.

Le attuali soluzioni di monitoraggio utilizzate dall'industria includono strumentazione in pozzo, estensimetri, ispezioni in loco e rilevamento convenzionale. Le limitazioni importanti di questi metodi includono difficoltà nell'ottenere misurazioni spazialmente continue e ad alta precisione

su grandi aree, comprese le aree al di fuori dei tracciati. Conseguentemente tutto questo limita l'identificazione precoce e accurata delle pericolosità geologiche.

Le metodologie presentate in questo studio invece possono rappresentare un beneficio in termini di pianificazione di nuove infrastrutture e molto utile nell'assegnazione ottimale delle risorse per monitorare l'opera in costruzione o già in essere. Questo perché l'interferometria satellitare permette misure simultanee della deformazione del terreno a intervalli regolari, con grande accuratezza (millimetri), buona risoluzione spaziale (pochi metri) e soprattutto ampia copertura areale ($10^2 - 10^3 \text{ km}^2$).

Nella tabella sottostante vengono inserite le diverse pericolosità geologiche (Tab. 1.1.).

Tectonic/Geological [Process]		Geotechnical [Ground]		Geomorphological/Hydrotechnical [Surface]
Neo-Tectonic Fault Rupture		Debris Flows, Mudslides, Rockfalls		River Bed Scour
Seismic Liquefaction		Salt, Gypsum or Ph damage/corrosion		Degradation/Avulsion
Seismic ground displacement		Rock Strength or Degree of Jointing/Fracturing		Bank Erosion
Mud Volcanoes		Loess and Other Metastable Soils		Flooding
Tsunami Wave and Erosion		Rock Dissolution (e.g. Karstic or Gypsum Cavities)		Encroachment
Sand Dune Migration		Permafrost degradation		Soil Erosion
Landslides	Through Route	In-Situ Soil Movement	Collapse/Subsidence	River Channel Migration
	Above Route		Clay Swelling/Shrinkage	Gullyng/Dissection
	Below Route		Compressibility	Fluvial Debris Impact
Volcanic Eruptions				Steep Gradients/Sidelong Ground

Tab. 1.1. Tabella riassuntiva delle pericolosità geologiche. In rosso sono indicati quelli indagabili con immagini radar ad apertura sintetica (Modificato da GO-ELS LTD, 2008)

1.2. Struttura della tesi

La tesi si compone in totale di sei capitoli compresa la parte introduttiva. Nella trattazione vengono introdotti i principali ambiti di utilizzo dell'interferometria satellitare nell'analisi dei rischi geologici. Questo avviene attraverso la presentazione di alcuni casi studio, che presentano, più o meno direttamente, affinità con le problematiche riscontrabili durante le fasi di progettazione, costruzione o esercizio di una infrastruttura lineare.

- Il **Capitolo 2** introduce rapidamente i concetti fondamentali dell'interferometria radar da satellite e le tecniche maggiormente utilizzate;
- Il **Capitolo 3** è dedicato all'utilizzo dell'InSAR per l'analisi delle deformazioni del terreno prodotte da forti eventi sismici e dalla tettonica attiva. Nell'ottica della caratterizzazione di un'area soggetta a questo tipo di eventi vengono presentate delle metodologie di rilevamento delle fratture cosismiche tramite tecniche D-InSAR, opportunamente validate sul terreno. Inoltre, sono presentati alcuni risultati relativi ad analisi multi-temporali per l'individuazione delle deformazioni asismiche;
- Il **Capitolo 4** vuole invece dimostrare l'importante valore aggiunto che il telerilevamento SAR satellitare può dare al monitoraggio dei fenomeni indotti dalla costruzione di un'opera in sotterraneo sull'ambiente e le strutture circostanti. Questo sia nell'ottica di escludere possibili deformazioni precedenti, sia nel poter monitorare, o valutare a posteriori, quella che possa essere stata, per esempio, l'effettiva subsidenza indotta;
- Il **Capitolo 5** valuta le performances dell'utilizzo delle tecniche interferometriche per la caratterizzazione di frane e per lo screening preliminare del geo hazard su aree vaste. Viene presentato, e validato con i dati disponibili, un metodo per affrontare il problema della mancanza di riflettori in aree rurali poco densamente edificate.

2. INTERFEROMETRIA SATELLITARE

2.1. Introduzione

Con il termine telerilevamento, in inglese *remote sensing*, si indica l'insieme delle differenti tecniche che permettono, anche da grandi distanze, lo studio di un oggetto o di un particolare fenomeno. Questo avviene attraverso la misurazione delle radiazioni elettromagnetiche emesse, riflesse o trasmesse dalle superfici fisiche interessate (Campbell, 2002). Le varie tecniche di telerilevamento possono essere distinte in base alla porzione di spettro elettromagnetico utilizzato (Fig. 2.1.). Questo lavoro di tesi è incentrato sul telerilevamento RADAR (*Radio Detection and Ranging*) (Skolnik, 2008), del quale i principi fondamentali verranno approfonditi nei prossimi paragrafi. In particolare, le applicazioni presentate sono esclusivamente basate sul Radar ad Apertura Sintetica (SAR) installato su piattaforma satellitare e sull'utilizzo delle tecniche interferometriche. L'InSAR (*Satellite Synthetic Aperture Radar Interferometry*) è una tecnica di telerilevamento attiva, poiché si basa sull'utilizzo di sensori in grado di emettere onde elettromagnetiche (microonde) e riceverne la frazione retro diffusa dai diversi bersagli a terra (*target*). Grazie al potere penetrante delle microonde rispetto alle nuvole, l'acquisizione dei dati SAR può avvenire indipendentemente dalle condizioni meteorologiche. Inoltre, essendo un sistema di telerilevamento attivo, le operazioni avvengono indistintamente sia di giorno che di notte.

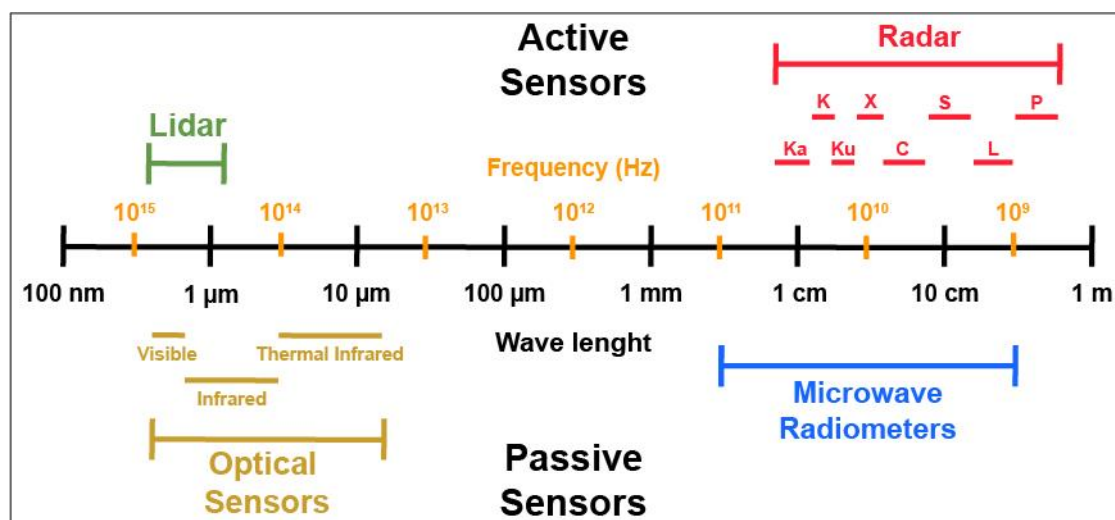


Fig. 2.1. Spettro delle onde elettromagnetiche con inseriti i rispettivi sensori.

Questo tipo di satelliti osservano la superficie del pianeta Terra seguendo un'orbita cosiddetta eliosincrona polare bassa, da una distanza che va dai 500 agli 800 km. Un satellite SAR sorvola

ogni dato punto della Terra sempre alla stessa ora solare locale. La combinazione di orbita quasi-polare e la naturale rotazione terrestre (Est-Ovest), permettono di ottenere una copertura areale completa della superficie terrestre sia durante il percorso ascendente (Sud-Nord) che durante quello discendente (Nord-Sud). La prima missione di acquisizione sistematica globale di immagini SAR è stata quella compiuta dal satellite ERS-1, lanciato nel luglio 1991 dall'Agenzia spaziale europea (ESA), operante in banda C (5.3 GHz) e avente una risoluzione spaziale di circa 25 m, rispettivamente in *azimut* e *range*. Nel 1995 è avvenuto il lancio di ERS-2, perlopiù identico al precedente. Questi hanno lavorato in “*tandem*” per circa nove mesi, fornendo per questo periodo un tempo di *revisit* di sole 24 ore. La missione è terminata nel 2001. Molte altre missioni si sono poi succedute negli anni a venire, migliorando in termini di risoluzione e tempo di rivisita. Per questo motivo è possibile condurre, con buona continuità, analisi storiche dal 1992. Inoltre, non richiedendo riflettori artificiali sul terreno, è possibile investigare fenomeni deformativi del passato.

Nella figura 2.2. sono inserite le principali missioni satellitari passate e presenti e le loro principali caratteristiche.

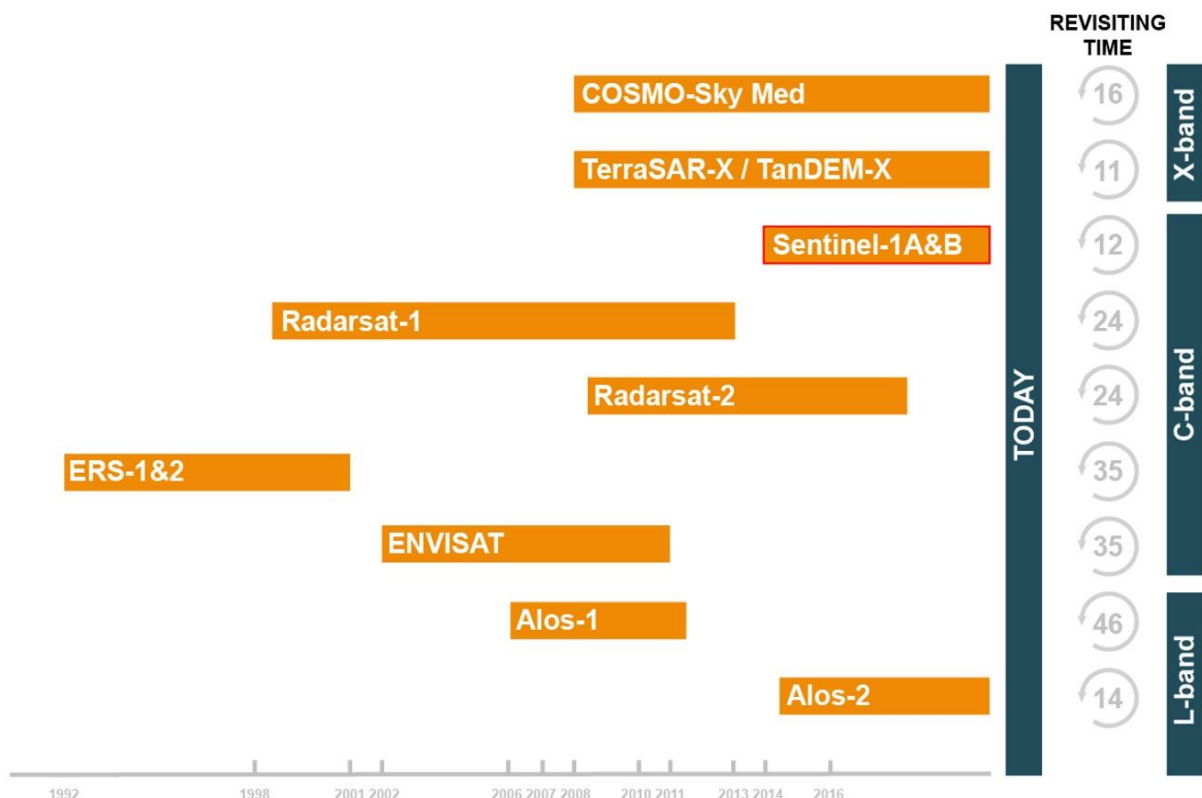


Fig. 2.2. Principali missioni SAR dal 1992. Per ognuna di esse è indicata la vita operativa, il tempo medio di *revisit* e la banda utilizzata dal sensore.

In questa tesi le applicazioni presentate sono basate sull'utilizzo dei dati forniti dalla missione Sentinel-1. Quest'ultima è una delle missioni spaziali dell'ESA (*European Space Agency*)

facente parte del programma Copernicus, finalizzato a fornire entro il 2021 la capacità all'Unione Europea di agire autonomamente nel settore della sicurezza e dell'ambiente attraverso le rilevazioni satellitare. Le missioni Sentinel prevedono sei tipologie di satellite che insieme forniscono immagini radar, immagini ottiche, servizi sul monitoraggio globale di aree terrestri e oceaniche, dati sulla composizione atmosferica e rilievi altimetrici di precisione.

La missione Sentinel-1 è composta da una costellazione di due satelliti che condividono lo stesso piano orbitale (con uno sfasamento di 180°) e acquisiscono quotidianamente dati radar secondo una precisa programmazione, volta a produrre un archivio a lungo termine, coerente nel tempo, utile per applicazioni basate su serie storiche. I satelliti Sentinel-1A e Sentinel-1B orbitano a 693 km di altezza e predispongono di un radar ad apertura sintetica in banda C a doppia polarizzazione (HH+HV, VV+VH). Il primo satellite è stato lanciato nel 2013 e fornisce dati dal 2014. Il suo gemello è in orbita dal 2016. È previsto il lancio di un terzo satellite. Questi forniscono dati in continuità con quelli provenienti dalle precedenti missioni ERS ed Envisat. Gli obiettivi principali di questa missione, oltre a quello di monitorare i rischi derivanti dalle deformazioni della superficie terrestre, sono il monitoraggio delle calotte glaciali e dell'ambiente artico, ma anche di sorveglianza marina e terrestre. Naturalmente forniscono anche un utile sostegno alle operazioni di aiuto umanitario durante situazioni di crisi.

Attraverso gli strumenti di bordo è mantenuto uno stretto controllo sui parametri orbitali. Il posizionamento del satellite lungo la traiettoria viene mantenuto all'interno di un "tubo orbitale" di 50 metri di raggio che si estende attorno al tracciato nominale dell'orbita. Un posizionamento preciso è fondamentale soprattutto per le applicazioni interferometriche.

Le piattaforme Sentinel-1 operano secondo quattro modalità di *imaging* (Fig. 2.3.) Queste si differenziano per risoluzione spaziale, angolo di incidenza e polarizzazione. Inoltre, ogni modalità acquisisce dati con *swath* di dimensioni diverse. Con questo termine si indica la dimensione della porzione di superficie terrestre acquisita dal sensore.

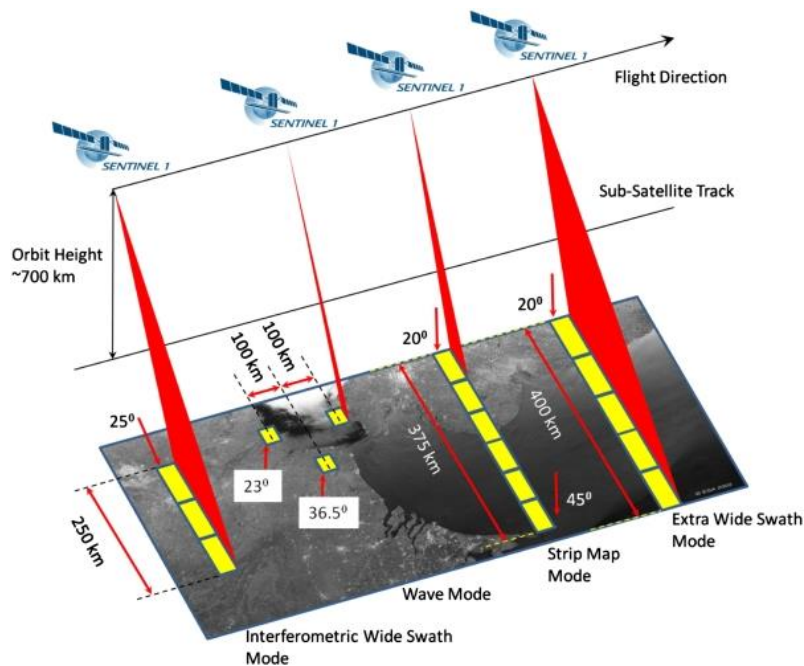


Fig. 2.3. Modalità di acquisizione dei satelliti Sentinel-1 (Fonte: ESA).

La modalità di acquisizione principale è denominata *Interferometric Wide Swath* (IW). Questa acquisisce *swath*, di 250 km suddivisi in tre porzioni (*sub-swaths*) attraverso la tecnologia di movimento dell'antenna nota come *Terrain Observation with Progressive Scans SAR* (TOPSAR). Altre modalità sono la *wave mode* (WM), utilizzata in mare aperto, la modalità *stripmap mode* (SM), utilizzata in casi eccezionali e la *Extra Wide Swath mode* (EW), perlopiù utilizzata per finalità di sorveglianza marittima. Nella tabella seguente sono inserite le caratteristiche delle diverse modalità di acquisizione (Tab. 2.1.).

Mode	Angle of Incidence	Resolution Rng x Azi (m)	Pixel Spacing Rng x Azi (m)	Swath Width	Polarizations
<i>Stripmap</i>	20°- 45°	1.7x4.3 to 3.6x4.9	1.5x3.6 to 3.1x4.1	80 km	HH+HV, VH+VV, VV
<i>Interferometric Wide Swath</i>	29°- 46°	2.7x22 to 3.5x22	2.3x14.1	250 km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
<i>Extra Wide Swath</i>	19°- 47°	7.9x43 to 15x43	5.9x19.9	400 km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
<i>Wave</i>	22°- 35° 35°- 38°	2.0x4.8 3.1x4.8	1.7x4.1 2.7x4.1	20x20 km	HH, VV

Tab. 2.1. Modalità di acquisizione. Le caratteristiche indicate valgono per i prodotti Level-1 SLC. Si noti che la risoluzione spaziale è una misura della capacità del sistema di distinguere tra target adiacenti mentre la spaziatura dei pixel è la distanza tra i pixel adiacenti in un'immagine, misurata in metri.

I dati acquisiti sono processati ed archiviati sistematicamente dai centri di controllo a terra. Questi provvedono poi a renderli disponibili online, gratuitamente, per il download diretto tramite un portale dedicato (<https://scihub.copernicus.eu>). I prodotti, preprocessati e non, sono distribuiti secondo un sistema a livelli:

- Livello 0 *raw*: dati grezzi, non compressi e non calibrati. Da questi derivano tutti i livelli successivi
- Livello 1 *Single Look Complex* (SLC): dati calibrati e georiferiti usando i dati orbitali restituiti dal satellite. Contengono sia i valori di fase che di ampiezza del segnale.
- Livello 1 *Ground Range Detected* (GRD): dati calibrati, georeferenziati e proiettati al suolo usando un modello ellissoidale. Sono disponibili a risoluzioni diverse. Non mantengono i valori di fase, ma solo di ampiezza.
- Livello 2: prodotti utilizzati per applicazione oceanografiche, per lo studio delle correnti, delle onde e del vento.

I dati Sentinel-1 hanno copertura planetaria e ridotti tempi di rivisita che vanno dai 6 ai 24 giorni.

La mappa seguente illustra lo scenario di osservazione fornito dalla costellazione Sentinel-1 in termini di modalità di geometria di acquisizione, frequenza e *revisit time*. I dati sono aggiornati a maggio 2019 (Fig. 2.4.).

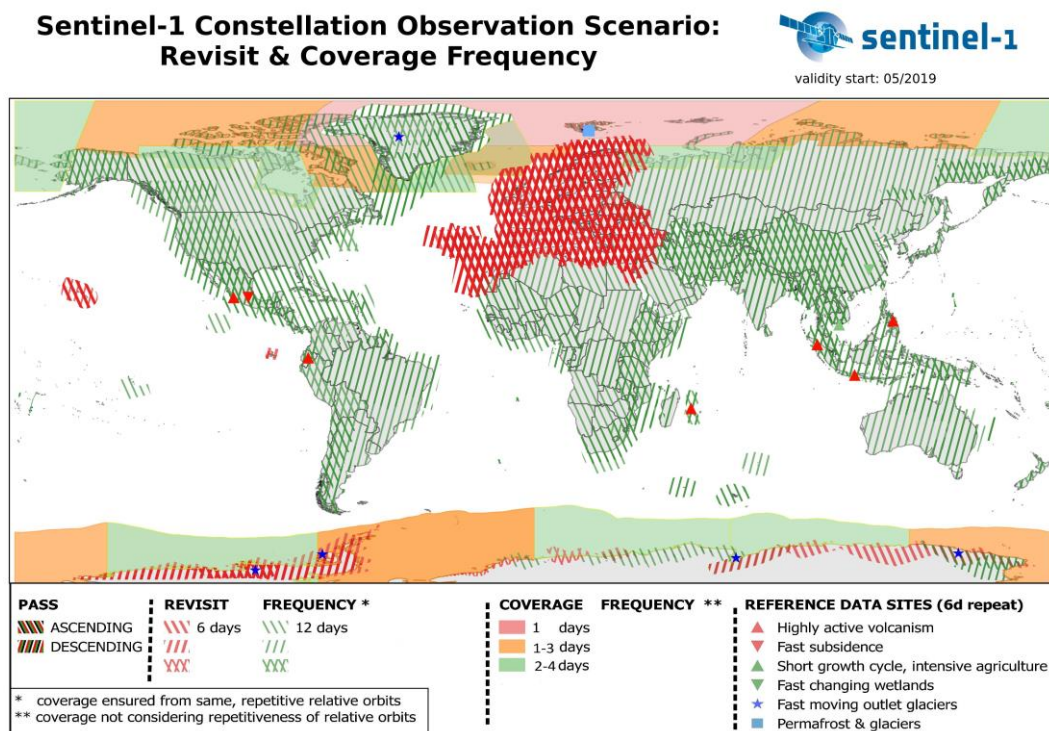


Fig. 2.4. Scenario di osservazione della missione Sentinel-1 (Maggio 2019) (Fonte: ESA)

2.2. Principi

Come accennato precedentemente, lo sviluppo dei sistemi radar satellitari vede la sua motivazione principale nella necessità, non soddisfatta dai noti sistemi ottici, di operare in continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa, sia di giorno che di notte. Il principio di funzionamento del radar è apparentemente semplice: un'antenna trasmittente invia un'onda elettromagnetica che, illuminando lo spazio circostante, va a incidere sugli oggetti presenti. Il segnale trasmesso è caratterizzato da una lunghezza d'onda (λ) appartenente all'intervallo delle microonde, con intervalli λ che vanno da ~ 1 mm e ~ 1 m (0,3-30 GHz). Questo segnale a sua volta subisce fenomeni di riflessione disordinata (diffusione, scattering). A seconda delle proprietà elettromagnetiche del bersaglio al suolo, una parte più o meno significativa del segnale diffuso rimbalza e torna indietro. Calcolando l'intervallo di tempo che intercorre tra l'invio del segnale e la ricezione dello stesso, il radar è in grado di stimare la distanza (*range* o *slant range*) dei bersagli a terra. Nei sistemi RAR (*Real Aperture Radar*), la risoluzione in azimuth è direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda (λ) e alla distanza dal bersaglio (R). È invece inversamente proporzionale alla lunghezza dell'antenna (L) (Picardi 1995; Samuel et al. 2004):

$$\delta AZ_RAR = \lambda R/L$$

Il SAR è una tipologia particolare di radar sviluppata per aumentare la risoluzione spaziale in azimuth (*cross range*). Per fare questo il sistema sfrutta il movimento dell'antenna lungo la sua traiettoria per simulare l'utilizzo di una antenna di dimensioni maggiori (Fig. 2.5.). In questo modo è possibile superare le limitazioni che derivano dalla relazione tra L e la risoluzione in azimuth. Questo è reso possibile sfruttando l'effetto Doppler.

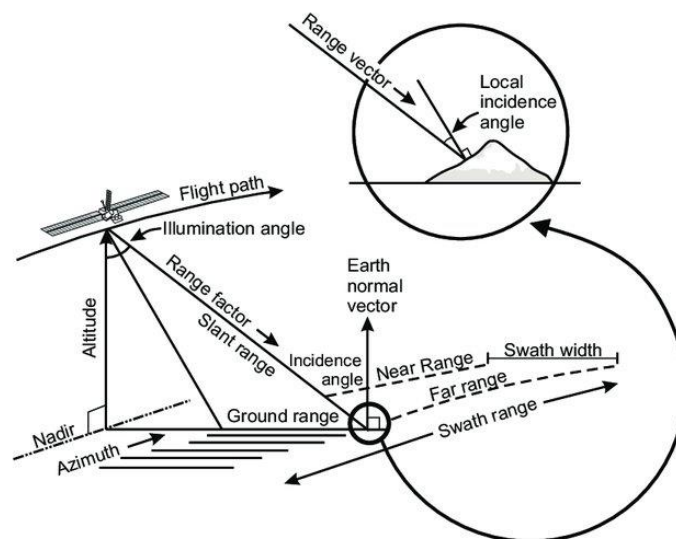


Fig. 2.5. Geometria di acquisizione di un satellite SAR.

La tecnica di processing che permette di convertire le informazioni ricevute dal sensore in un'immagine SAR è detta *focusing*. Il prodotto finale consiste in un'immagine *Single Look Complex* (SLC), una matrice bidimensionale dove le colonne rappresentano lo *slant-range* e le righe la direzione in azimut. Ogni pixel di un'immagine SLC è un valore complesso (S) descritto dalla seguente equazione:

$$S = A e^{-i\Phi} = \sum_{k=1}^N A_k e^{-i\Phi_k}$$

dove A è l'ampiezza del segnale retrodiffuso mentre Φ è la fase. Il valore di ampiezza è legato all'intensità del segnale riflesso dal target a terra, mentre la fase è il parametro chiave che permette di stimare gli spostamenti, poiché include le informazioni sulla distanza sensore-target.

Le immagini di ampiezza permettono di dedurre alcune informazioni sullo scenario osservato, come fossero particolari immagini ottiche monocromatiche, per questo motivo vengono sfruttate nel campo del monitoraggio, sia in ambito civile che militare. Invece, i valori di fase di una singola immagine appaiono completamente casuali, uniformemente distribuiti tra $-\pi$ e $+\pi$ (Fig. 2.6.). La fase è infatti una funzione periodica, con un periodo di 2π . La distribuzione casuale della fase in una singola immagine è dovuta al fatto che per ogni pixel, le variazioni di Φ sono estremamente piccole se comparate a R (distanza dal bersaglio). Per questo motivo pixel vicini possiedono valori di fase assai differenti l'uno dall'altro.

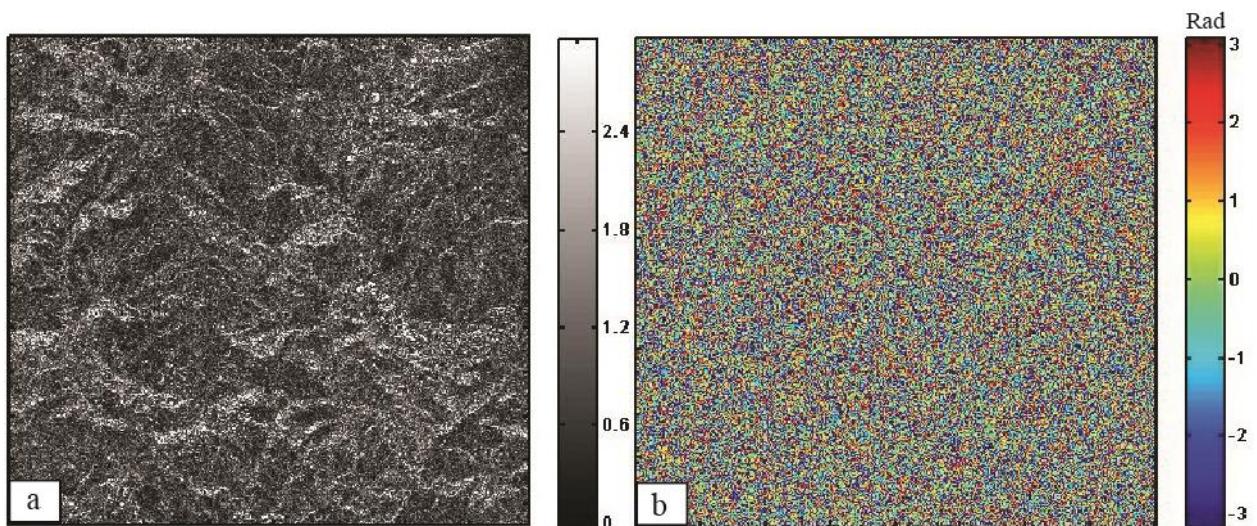


Fig. 2.6. Immagine SLC. a) Immagine di ampiezza; b) Valori di fase. Nella prima è possibile intuire la topografia e la presenza di edifici mentre la seconda appare solo come un insieme random di pixel.

La modalità di acquisizione non è ortogonale al suolo, ma avviene con un angolo di vista variabile (Fig. 2.5.). Per questo motivo le immagini focalizzate presentano inevitabilmente delle deformazioni prospettiche a causa della topografia (Fig. 2.7.).

In base all'inclinazione del terreno ne derivano tre diverse tipologie così definite:

- **Foreshortening**: quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore-bersaglio il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo pixel molto luminosi nell'immagine di ampiezza.
- **Layover**: è l'effetto di distorsione dovuto alla presenza di pendenze molto ripide o di strutture verticali. Quando la pendenza è maggiore dell'angolo di osservazione, il raggio radar raggiunge la parte superiore della struttura prima della base.
- **Shadowing**: si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso radar perché coperte da altri oggetti. Il segnale non viene retro diffuso e l'area appare completamente nera.

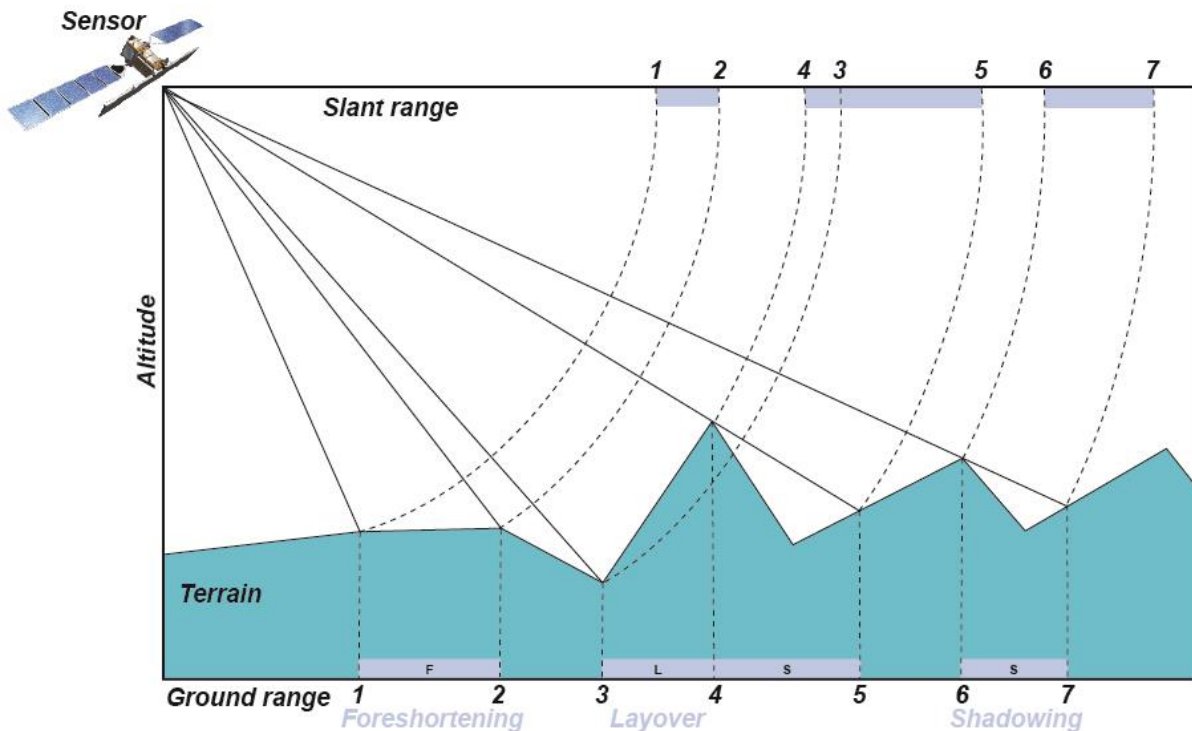


Fig. 2.7. Deformazioni prospettiche tipiche delle immagini SAR.

Le immagini SAR trovano applicazione in molte aree del telerilevamento. Le informazioni così ricavate vengono utilizzate in oceanografia, glaciologia, in geologia e in agricoltura. Con le immagini SAR è possibile stimare l'altezza delle foreste, i parametri della biomassa e la deforestazione. Inoltre, sono fondamentali nel monitoraggio ambientale, come nel caso delle fuoriuscite di petrolio (*oil spilling*), delle inondazioni, della crescita degli agglomerati urbani, dei cambiamenti globali in genere e della sorveglianza militare, compresa la politica strategica

e la valutazione tattica. Come accennato precedentemente anche il monitoraggio delle deformazioni indotte da vulcani, o dai terremoti, utilizza il dato SAR, elaborandolo attraverso le diverse tecniche di interferometria differenziale. Proprio a queste sono dedicate le prossime due sezioni di questo capitolo.

2.3. D-InSAR

Il radar ad apertura sintetica è un sistema di telerilevamento radar coerente che permette la generazione di interferogrammi. Un interferogramma è il risultato del prodotto di un'immagine (pixel per pixel) per il complesso coniugato di una seconda immagine, acquisita con la stessa geometria, in un secondo momento. Se esiste una correlazione tra due pixel corrispondenti in entrambe le immagini, la fase interferometrica fornisce una lettura precisa della distanza sensore-target. La fase infatti è una frazione della lunghezza d'onda che corrisponde a una misurazione precisa dell'allineamento tra due segnali radar (Fig. 2.8). Dato che i segnali a microonde presentano lunghezze d'onda nell'ordine dei centimetri, la fase interferometrica è potenzialmente in grado di leggere variazioni di distanza con precisione sub-millimetrica. La coppia di immagini complesse utilizzate devono necessariamente condividere il più possibile la stessa geometria di acquisizione.

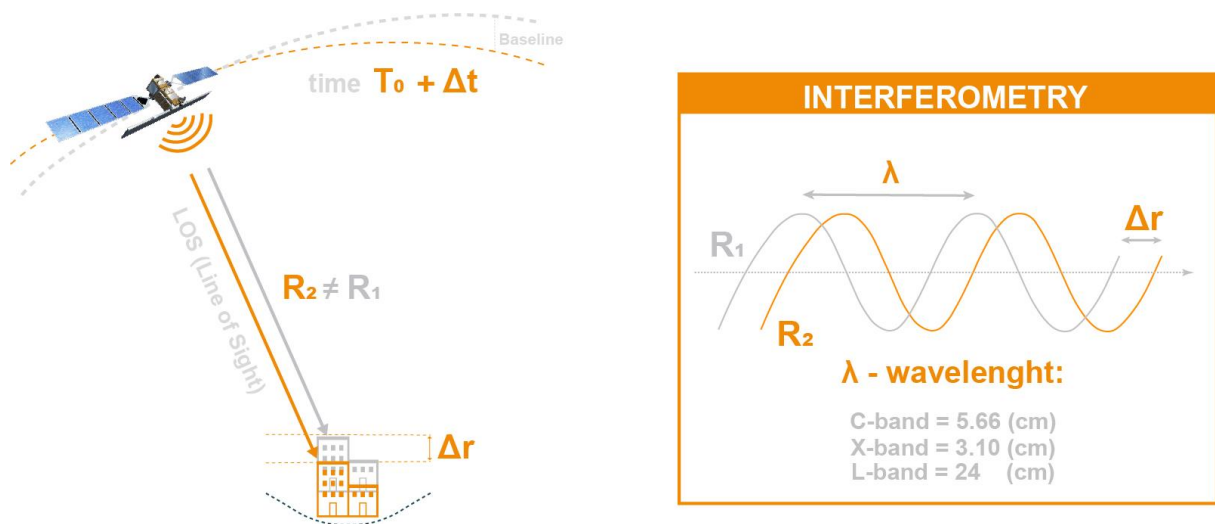


Fig. 2.8. Principi dell'interferometria differenziale satellitare. (Modificato da TRE-Altamira).

L'interferometria differenziale, indicata con la sigla D-InSAR (*Differential SAR Interferometry*) è la tecnica base per individuare e monitorare le deformazioni da satellite (Massonnet & Feigl, 1998; Rosen et al., 2000). Alla fase interferometrica (ϕ_{int}), che consiste

quindi nella differenza di fase tra due acquisizioni, contribuiscono diversi fattori, che possono essere espressi dalla seguente equazione:

$$\varphi_{int} = \varphi_{topo} + \varphi_{flat} + \varphi_{disp} + \varphi_{atmo} + \varphi_{err}$$

nella quale φ_{topo} rappresenta il contributo relativo alla topografia, φ_{flat} rappresenta la cosiddetta “*flat earth component*” dovuta al differente angolo di vista delle due acquisizioni. φ_{disp} è il contributo effettivo dato dalla deformazione, φ_{atmo} è il valore di fase dato dall’atmosfera e φ_{err} invece rappresenta l’errore, il rumore dato da più effetti incontrollati (per esempio la decorrelazione, errori orbitali ecc). Il satellite durante il suo volo all’interno del “tubo orbitale”, acquisisce immagini da posizioni leggermente diverse, andando inevitabilmente a modificare leggermente il punto di osservazione tra una immagine e l’altra. Questa variazione di posizione è indicata con il termine *baseline*, la cui componente perpendicolare è indicata come *normal baseline* (B_{\perp}). È proprio l’effetto di parallasse, dato dalla differente posizione del satellite, che permette di misurare la fase interferometrica dovuta alla topografia. Infatti, l’accuratezza sulla misurazione della quota è direttamente proporzionale alla B_{\perp} . Perciò maggiore la *normal baseline*, migliore sarà la sensibilità del sistema per rappresentare la topografia. Come verrà introdotto nei paragrafi successivi, questo avveniva soprattutto con le prime generazioni di satelliti, che vedevano nella creazione di DEM, uno dei loro scopi principali. Con la missione Sentinel-1 invece il valore di B_{\perp} viene mantenuto il più basso possibile per privilegiare le applicazioni InSAR.

La fase topografica può essere stimata e sottratta da un interferogramma usando un DEM di riferimento. Lo stesso discorso è valido per la componente φ_{flat} che può essere rimossa usando un ellissoide di riferimento. Un interferogramma differenziale viene prodotto solo quando i contributi dati dal DEM e dall’ellissoide sono stati rimossi, lasciando solo la fase relativa alla deformazione avvenuta tra un’acquisizione e l’altra:

$$\varphi_{disp} = (4\pi/\lambda)\Delta r$$

Dove Δr rappresenta la deformazione lungo la linea di vista del satellite (LOS).

Un esempio di interferogramma è mostrato nella figura sottostante (Fig. 2.9.).

L’interferogramma è stato generato utilizzando una coppia di immagini Sentinel-1 acquisite al confine tra Iran e Iraq nel 2017. Tra la prima e la seconda immagine è avvenuto un terremoto di Mw 7.3. La deformazione dovuta alla riattivazione di un esteso fronte di sovrascorrimento è evidenziata dal numero delle frange interferometriche. Ogni frangia indica circa 2.8 cm di

deformazione lungo la LOS. L'orbita utilizzata è quella ascendente. Per rimuovere la componente topografica è stato utilizzato il DEM SRTM della NASA.

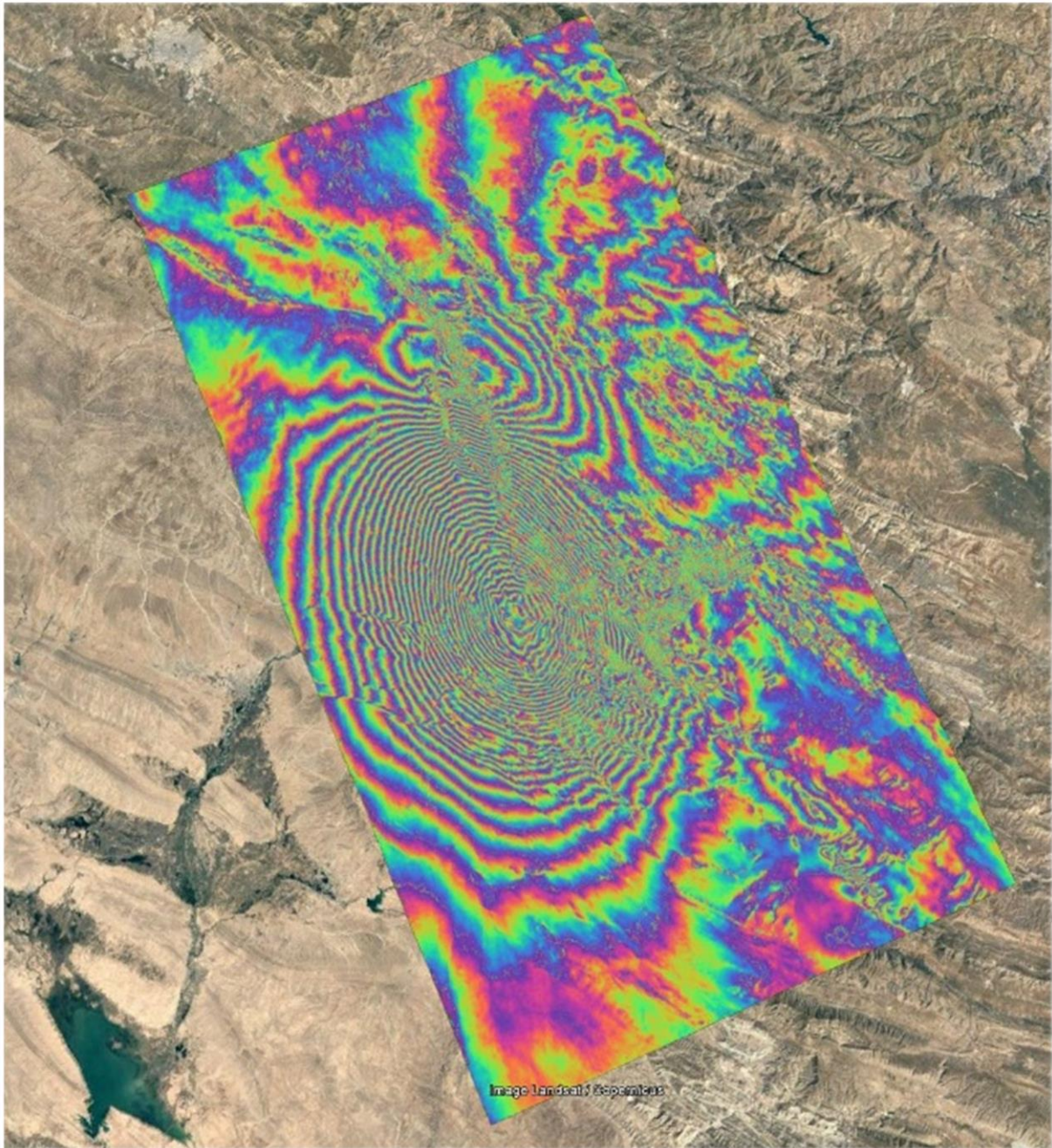


Fig. 2.9. Interferogramma differenziale (wrapped) relativo al terremoto di Mw 7.3 avvenuto nel 2017 tra Iran e Iraq. Geometria ascending. L'interferogramma è stato prodotto con due immagini Sentinel utilizzando il software SNAP dell'ESA.

L'interferometria differenziale classica non permette di stimare direttamente la componente atmosferica data dalle differenti condizioni di umidità, temperatura e pressione. Questa può invece essere stimata e rimossa solamente attraverso le tecniche multimmaginario A-DInSAR o utilizzando recenti algoritmi che provvedono la correzione degli interferogrammi attraverso

l'ingestione di dati metereologici reali, come GACOS (Yu et al., 2017 e 2018) o PyAPS (Jolivet et al., 2011 e 2012).

Diversi effetti possono ridurre, o addirittura compromettere, la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi D-InSAR, soprattutto i fenomeni di decorrelazione temporale. Questi sono causati dalla variabilità delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli a terra tra i diversi giorni di acquisizione del dato. L'intervallo di tempo tra due immagini è indicato con il termine *baseline* temporale. Le zone vegetate sono facilmente influenzabili dal vento e mutano di aspetto a seconda della stagione. Per questo motivo sono aree caratterizzate da veloce decorrelazione. Al contrario, le zone ricche di edifici, o le rocce esposte, rimangono maggiormente stabili nel tempo. La qualità di un interferogramma dipende anche dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini, la B_{\perp} del quale si è accennato precedentemente. Tale disturbo è denominato decorrelazione geometrica.

Una stima quantitativa sulla qualità di un interferogramma può essere descritta da un parametro noto come coerenza spaziale. Questa misura indica quanto un bersaglio, o una zona osservata, ha mantenuto costante la propria riflettività nel tempo intercorso tra due diverse acquisizioni (Bamler et al., 1993). La coerenza associata a ciascun pixel di un interferogramma può essere calcolata come l'ampiezza del coefficiente di correlazione tra le due immagini SAR complesse che formano l'interferogramma.

Il valore di coerenza è sempre compreso tra 0 e 1, dove 1 rappresenta massima coerenza, cioè una completa corrispondenza della risposta del pixel all'onda elettromagnetica. Lo zero (coerenza nulla) indica invece la completa decorrelazione delle caratteristiche di riflettività del segnale da parte di un bersaglio. Il valore di coerenza è quindi funzione della decorrelazione spaziale del sistema, quale un rumore addizionale, e della decorrelazione temporale tra le due immagini.

La generazione di mappe di coerenza può quindi essere utile a determinare la qualità della misura della fase interferometrica ma anche per estrarre informazioni tematiche di interesse per alcune proprietà del terreno (umidità, rotture cosismiche ecc) e valutarne il cambiamento nel tempo.

La creazione di un'interferogramma differenziale e l'analisi di aree deformate verranno trattate in dettaglio al capitolo 3.

2.4. A-DInSAR

Nel capitolo precedente, sono stati introdotte le basi dell'interferometria classica. Questa promettente tecnologia non è comunque esente da una lunga serie problemi. La qualità degli interferogrammi risente ampiamente dei fenomeni di decorrelazione, sia temporale che geometrica. Inoltre, può essere molto difficile separare la fase topografica residua da quella data dalla deformazione reale se non si ha a disposizione, per l'area di interesse, un buon modello di elevazione. Se ciò non bastasse, la fase interferometrica è "arrotolata" (*wrapped*) nell'intervallo $-\pi, \pi$. L'ambiguità di fase relativa alla periodicità del segnale deve essere rimossa durante il processing definendo il corretto coefficiente intero al periodo 2π per ogni valore misurato. Questo processo di "srotolamento" (*unwrapping*) non è facilmente risolvibile, e a volte, questa delicata e complessa fase di processing, può essere addirittura impossibile da eseguire. Infine, il contributo dato dall'atmosfera può creare degli artefatti che possono falsare profondamente il segnale rilevato. Una soluzione a questi problemi è data dall'utilizzo simultaneo di un ampio dataset di immagini coregistrate (*stack*), sviluppando le tecniche note come A-DInSAR (*Advanced Differential SAR Interferometry*) o Multi-Temporal InSAR alle quali diversi gruppi di ricerca hanno lavorato negli ultimi anni (Ferretti et al., 2000, 2001; Berardino et al., 2002; Hooper et al., 2004; Kampes et al., 2006; Perissin & Wang, 2012)

Per una lista completa di riferimenti bibliografici si rimanda ad una review che riassume lo stato dell'arte del SAR e delle tecniche multi-temporali (Crosetto et al., 2009). Il lancio del satellite ERS-1 nel 1991 ha permesso, per la prima volta, di avere a disposizione un numeroso dataset di immagini, ripetutamente acquisite sulle stesse aree. Per questo motivo, nei primi anni 2000, presso il Politecnico di Milano, è stata sviluppata la tecnica dei *Permanent Scatterers* (PS-InSAR) (Ferretti et al., 2000, 2001). Questa fonda i suoi principi sul presupposto che, analizzando una lunga serie di immagini SAR, sia possibile isolare quei determinati target che mantengono inalterate le proprie caratteristiche elettromagnetiche in ognuna di esse (alta stabilità del segnale nel tempo). I PS sono tipicamente parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, elementi già presenti al suolo per i quali le caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione. Ciò non accade ad esempio per la vegetazione, che muta di continuo. Questi bersagli a terra (PS) non subiscono decorrelazione nel tempo, sia geometrica che temporale, perciò la loro fase può essere studiata in funzione dei parametri di acquisizione (baseline normale e temporale). I contributi di fase dati dall'elevazione, dal *displacement* e dall'atmosfera possono essere quindi separati e stimati con precisione. La tecnica classica *PS-InSARTM*, e la maggior parte delle successive varianti, che possono essere indicate con il termine generico PSI (*Persistent Scatterers Interferometry*)

(Kampes, 2006), utilizzano una configurazione *single-master*. Ciò significa che ogni immagine contenuta nel dataset (*slave*) viene coregistrata ad un'unica immagine di riferimento (*master*), generalmente scelta in maniera da minimizzare gli effetti dati dai valori di baseline (temporale e geometrica). Questo si traduce nel selezionare come *master* un'immagine che si trovi al centro (sia temporalmente che spazialmente) dello stack, in modo da ottimizzare la coerenza (Kampes, 2006). Il modo più semplice di rappresentare uno stack di interferogrammi è il grafico a stella (*single master star graph*) (Fig. 2.10.).

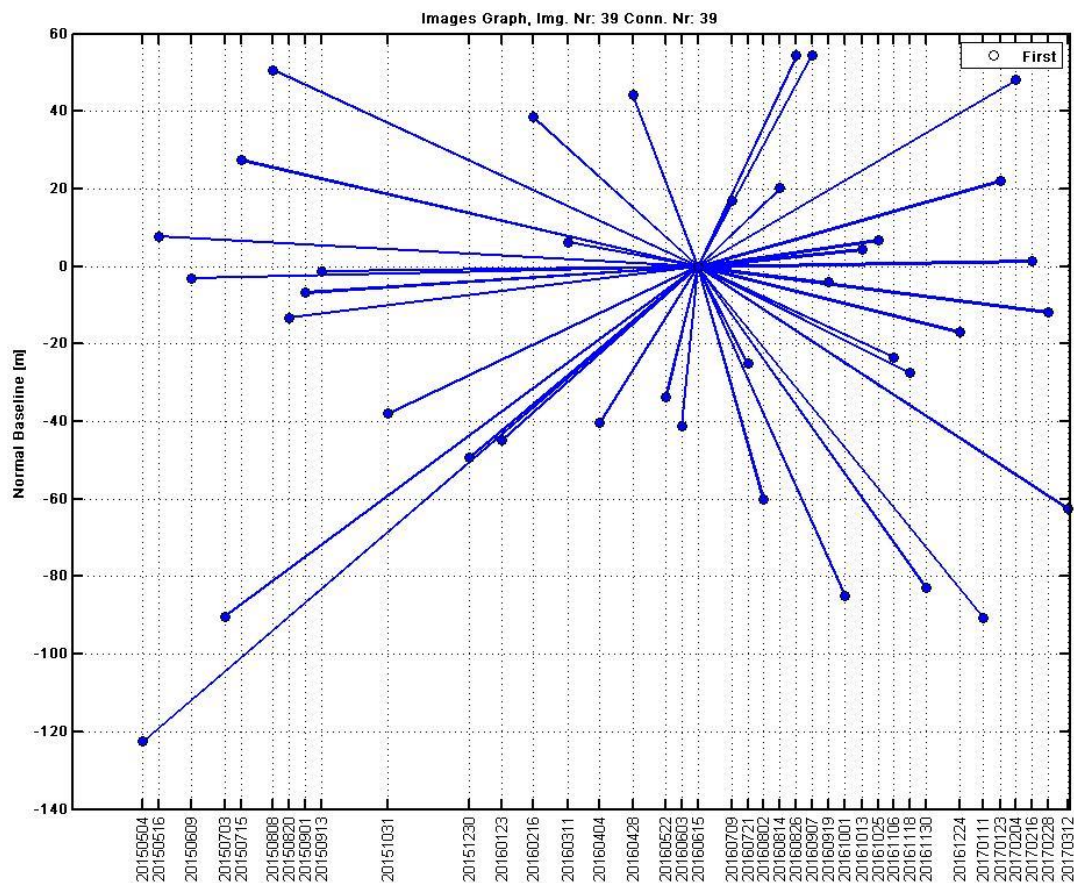


Fig. 2.10. Un esempio tipico di *single master star graph*. Ogni punto corrisponde ad un'immagine. Le linee di connessione rappresentano un'interferogramma.

Uno degli step principali della tecnica PSI, consiste nell'individuazione e rimozione dei disturbi atmosferici (*Atmospheric Phase Screen, APS*), così da consentire l'estrazione della porzione di segnale contenente l'informazione sul moto dei target PS (*Persistent Scatterers*). L'algoritmo che consente di stimare gli effetti atmosferici si basa sull'osservazione che, in una serie storica di immagini radar, tali effetti variano lentamente nello spazio e sono decorrelati nel tempo. Il moto dei singoli bersagli radar risulta invece correlato tra un'immagine e quella successiva. Dopo la rimozione del disturbo atmosferico, l'analisi prevede per ciascun candidato PS la stima

del *trend* medio di spostamento, e la ricostruzione della serie storica di deformazione. Tutti i movimenti stimati sono sempre relativi ad un punto dell'immagine assunto come riferimento e supposto fermo.

Tuttavia, le tecniche che seguono un approccio PSI sono molto efficienti solamente in aree urbanizzate. Questo è dovuto alle regole, molto restrittive, che guidano l'algoritmo. Infatti, per non essere escluso dall'analisi, un candidato PS deve necessariamente essere coerente in ogni interferogramma della serie temporale. Solamente alcuni target puntuali, che caratterizzano un solo pixel, rispondono a questa caratteristica. Spesso sono edifici o altri manufatti antropici, perciò non è sempre possibile analizzare le deformazioni che avvengono in aree rurali. (Fig. 2.11.)

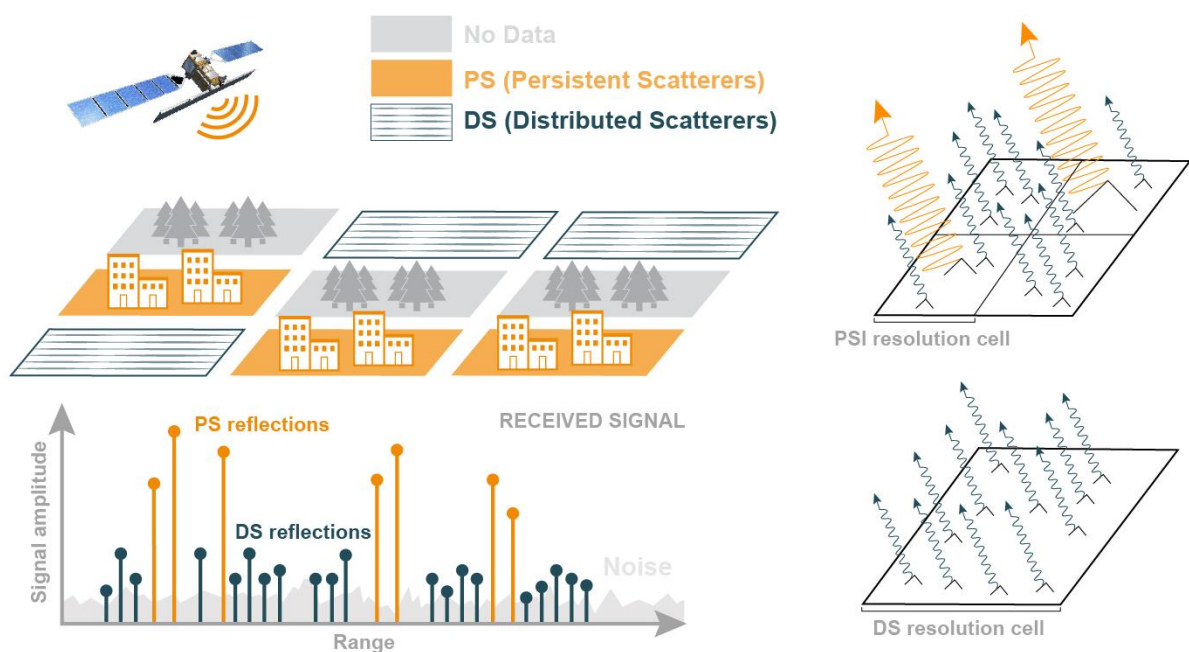


Fig. 2.11. Differenze tra PS e DS (Modificato da TRE-Altamira). I PS corrispondono a target puntiformi che dominano il segnale in un pixel.

Per questo motivo, negli ultimi anni, sono state introdotte metodologie volte a estrarre informazioni da altri target a terra noti come *Distributed Scatterers* (DS). I cosiddetti target distribuiti, caratterizzano un gruppo di pixel, e corrispondono spesso ad aree detritiche, campi non coltivati ed aree desertiche non sabbiose. A differenza di un target puntiforme (PS), dove l'energia retro-diffusa verso il sensore risulta elevata e concentrata in un'area molto ridotta, l'intensità caratterizzante un pixel appartenente a un DS è solitamente meno forte, perché manca un bersaglio dominante.

I metodi *distributed scatterer* (DS), allentano i limiti rigorosi imposti alla stabilità della fase nel tempo e permettono di includere nell'analisi le aree affette da decorrelazione attraverso

l'utilizzo di un network ridondante di interferogrammi. I metodi DS possono essere divisi in due categorie, a seconda del numero di interferogrammi utilizzato. La prima categoria utilizza un network di interferogrammi caratterizzati da baseline temporali e spaziali ridotte, note come Small Baseline Subsets (SBAS) (Berardino et al., 2002). Questi metodi richiedono necessariamente l'*unwrapping* della fase. La seconda categoria utilizza invece il network composto da tutti i possibili interferogrammi (*full graph*), sfruttando appieno la massima ridondanza raggiungibile (Ferretti et al., 2011; Guarnieri & Tebaldini, 2008). Inoltre, gli interferogrammi, in entrambe le categorie di metodo, vengono filtrati con diversi metodi, che vanno dal classico *multilooking* ad avanzati filtri adattativi.

Analisi di questo tipo vengono trattate in dettaglio al capitolo 3 e 5, nei quali vengono descritti ulteriormente i metodi attraverso l'applicazione a casi reali.

3. TETTONICA ATTIVA

Le infrastrutture lineari spesso attraversano aree tettonicamente attive soggette a forti terremoti. In corrispondenza di queste zone il terreno può subire delle grandi deformazioni durante la vita utile di un'opera. Le deformazioni permanenti del suolo indotte dai terremoti, come il movimento di faglie, frane sismoindotte e liquefazione, sono tra le maggiori cause di danni alle infrastrutture, soprattutto quelle sotterranee (tunnel, pipeline ecc.).

La fagliazione superficiale per esempio si manifesta come una deformazione differenziale del terreno che avviene in concomitanza di terremoti con magnitudo generalmente maggiore di M 5.5. Tuttavia, fenomeni di questo tipo possono essere causati anche da *creep* asismico.

La deformazione generalmente rimane confinata in una fascia ristretta intorno alla faglia principale. In alcuni casi però una faglia attiva può arrivare a rompere la superficie attraverso l'attivazione di strutture minori (*splays*), distribuendo la deformazione in un'area ben più ampia, anche di centinaia di metri. Questo determina un rischio da non sottovalutare per le infrastrutture lineari (sia sotterranee che superficiali) costruite o progettate lungo una faglia attiva e capace. Le infrastrutture lineari sono particolarmente vulnerabili alla fratturazione cosismica e devono essere progettate secondo misure specifiche al fine di ridurre, o evitare, perdite economiche o impatti ambientali, dovuti ad una rottura. Uno dei casi più noti di buona progettazione di un'opera riguarda il gasdotto Trans-Alaska, progettato appositamente per spostarsi lungo binari e assorbire ogni eventuale movimento della faglia *strike-slip* di Denali. Il gasdotto in questione ha infatti resistito a quasi 6 m di *offset* laterale durante il terremoto di M 7.9 avvenuto nel 2002 (Haeussler et al. 2004).

L'interferometria satellitare è stata utilizzata, per la prima volta, per mappare gli spostamenti cosismici causati dal terremoto di Landers (M 7.3) nel 1992 (Massonnet et al. 1998). Utilizzando una coppia di immagini SAR, una acquisita prima dell'evento sismico e l'altra dopo, l'interferometria può essere utilizzata per mappare il campo di deformazione sismica e, a sua volta, per stimare la posizione epicentrale, la geometria della faglia e le dinamiche di rottura. Analisi multi-temporali invece possono essere utilizzate per stimare l'accumulo di deformazione intersismica, cruciale per comprendere la deformazione continentale, il ciclo sismico e i pericoli sismici.

L'InSAR inoltre può registrare la deformazione della superficie del terreno immediatamente dopo un terremoto (per esempio la deformazione post-sismica), fornendo dati importanti per comprendere le proprietà della crosta terrestre e del mantello superiore. L'InSAR può svolgere

un ruolo sempre più importante nell'individuazione delle deformazioni secondarie, che si verificano durante un terremoto su faglie minori, non coinvolte direttamente nell'evento principale, quindi estremamente difficili da registrare con le tecniche geodetiche convenzionali (Fialko et al. 2002).

In questo capitolo è stato testato l'utilizzo dei dati Sentinel-1 e delle tecniche interferometriche per caratterizzare e monitorare due aree tettonicamente attive.

3.1. L'utilizzo dell'interferometria satellitare per la caratterizzazione di aree tettonicamente attive e il rilevamento preliminare della fratturazione cosismica.

3.1.1. Introduzione

Il rilevamento delle fratture cosismiche può fornire un insieme di dati molto importanti riguardanti l'assetto sismo tettonico di una regione, contribuendo a definirne con maggior precisione il rischio sismico. Inoltre, risulta utile per comprendere in dettaglio i fenomeni di fagliazione distribuita. Tuttavia, non è mai semplice, e soprattutto veloce, rilevare gli effetti cosismici direttamente sul terreno e poterli cartografare in dettaglio. Questo perché gli effetti cosismici di un terremoto di magnitudo elevata interessano generalmente aree molto vaste, spesso anche difficilmente raggiungibili. Lo stesso discorso vale per quanto riguarda la deformazione asismica. Questa agisce più lentamente, senza innescare violenti terremoti, ma producendo comunque nel tempo spostamenti importanti, anche dell'ordine delle decine di centimetri. Nell'ambito della progettazione di un'opera, l'interferometria satellitare può apportare un valido contributo alla caratterizzazione delle aree tettonicamente attive.

Gli interferogrammi cosismici infatti mostrano la deformazione elastica causata dal movimento della faglia principale e il movimento delle strutture minori associate. Alcuni autori, tra i quali Fukushima et al., 2013 e Guerrieri et al., 2010 hanno dimostrato che le discontinuità di fase che appaiono sugli interferogrammi possono, escludendo errori dati dall'atmosfera o dalla topografia, rappresentare spostamenti differenziali del terreno, che identificano l'attivazione di faglie minori e la presenza di rotture cosismiche. Price & Sandwell, 1998 hanno prodotto delle mappe del gradiente di fase direttamente dagli interferogrammi per visualizzare i lineamenti. Fujiwara et al., 2016 hanno mappato in questo modo le rotture superficiali lineari della sequenza del terremoto di Kunamoto 2016.

In questo capitolo le tecniche interferometriche sono applicate a due recenti sequenze sismiche, avvenute negli ultimi anni, in Italia centrale e in Sicilia. Entrambe hanno prodotto fratturazione

cosismica. Gli eventi sismici del Centro Italia del 2016 e 2017 hanno avuto inizio ad agosto 2016 con epicentri situati tra l'alta valle del Tronto, i Monti Sibillini, i Monti della Laga e i Monti dell'Alto Aterno (Chiaraluce et al., 2017). Il 24 agosto, un terremoto di Mw 6.0 ha colpito l'area di Accumoli e Amatrice. Il sisma ha provocato, lungo faglie estensionali immergenti a SW, diverse rotture del terreno, con offset decimetrico, per una distanza di oltre 10 km. Queste si sono riattivate, insieme a molte altre di nuova formazione, dopo l'evento principale (Mw 6.5) avvenuto il 30 ottobre. Due anni dopo, nel dicembre 2018, una sequenza sismica ha interessato le pendici sudorientali dell'Etna. Anche in questa occasione l'evento principale (Ml 4.0), con una profondità di soli 2 km, ha prodotto delle estese rotture cosismiche.

3.1.2. Materiali e metodi

In Italia, la modalità Sentinel-1 A/B *Interferometric Wide (IW) Swath TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR)* offre la possibilità di acquisire immagini con un tempo di rivisita di soli sei giorni. Questa enorme quantità di dati open è estremamente utile per il monitoraggio delle potenziali pericolosità geologiche legate dalla tettonica attiva. Questo studio è volto a testare l'utilità di questi dati per la caratterizzazione un territorio soggetto a terremoti moderati/forti e a fagliazione capace. Per questo motivo sono state condotte delle analisi utilizzando sia l'interferometria differenziale classica (D-InSAR) che multi-temporale (MT-InSAR). La prima, principalmente per indagare gli effetti cosismici sul terreno in seguito a un terremoto, soprattutto in termini di misura degli spostamenti e di rilievo delle fratture cosismiche. La seconda invece, per individuare eventuali movimenti asismici delle faglie attive, nella fase pre-sismica, inter-sismica e post-sismica. Nelle sezioni seguenti sono inserite le descrizioni dettagliate dei metodi utilizzati.

3.1.2.1. D-InSAR (Interferometria differenziale)

Gli effetti cosismici superficiali dei terremoti avvenuti in Italia centrale e in Sicilia sono stati investigati utilizzando i dati SAR acquisiti dalla missione Sentinel-1 dell'ESA. L'analisi interferometrica differenziale è stata condotta con l'uso del software *open source* SNAP (*Sentinel Application Platform*) che fornisce una utile *suite* di strumenti indispensabili a questo scopo. Le immagini radar da processare sono state scaricate dal sito ufficiale dell'ESA, denominato *Sentinel Open Hub* (<https://scihub.copernicus.eu/>).

In totale sono state processate 6 coppie di immagini (4 per l'Italia centrale, 2 per la Sicilia) in formato *Interferometric Wide (IW) Swath TOPSAR*. Ogni coppia, naturalmente, copre il periodo pre e post sismico relativo ad ogni main shock. Gli interferogrammi così ottenuti sono

stati analizzati con diverse tecniche per individuare le possibili fratture cosismiche. L'intero processo è riassunto nel diagramma nella figura 3.1.

Per poter procedere alla creazione degli interferogrammi, le immagini sono state precedentemente coregistrate utilizzando gli offset calcolati dai file dei parametri orbitali e un DEM di riferimento. La coregistrazione è infatti uno step preliminare necessario per poter confrontare due o più immagini SAR ricoprenti la stessa zona e acquisite con la stessa geometria. La coregistrazione permette di ottenere una perfetta sovrapposizione dei dati attraverso una registrazione spaziale e, se necessario, un *resampling*, qualora esistano delle differenze nella dimensione dei pixel.

Dopodiché, calcolando il prodotto complesso tra i valori dei singoli pixel che compongono le immagini, sono stati prodotti gli interferogrammi. La fase topografica è stata poi rimossa utilizzando il DEM SRTM a 30 metri della NASA. L'utilizzo di un DEM esterno di riferimento permette di valutare, partendo dalle quote altimetriche, i valori di fase (pixel per pixel) da sottrarre agli interferogrammi.

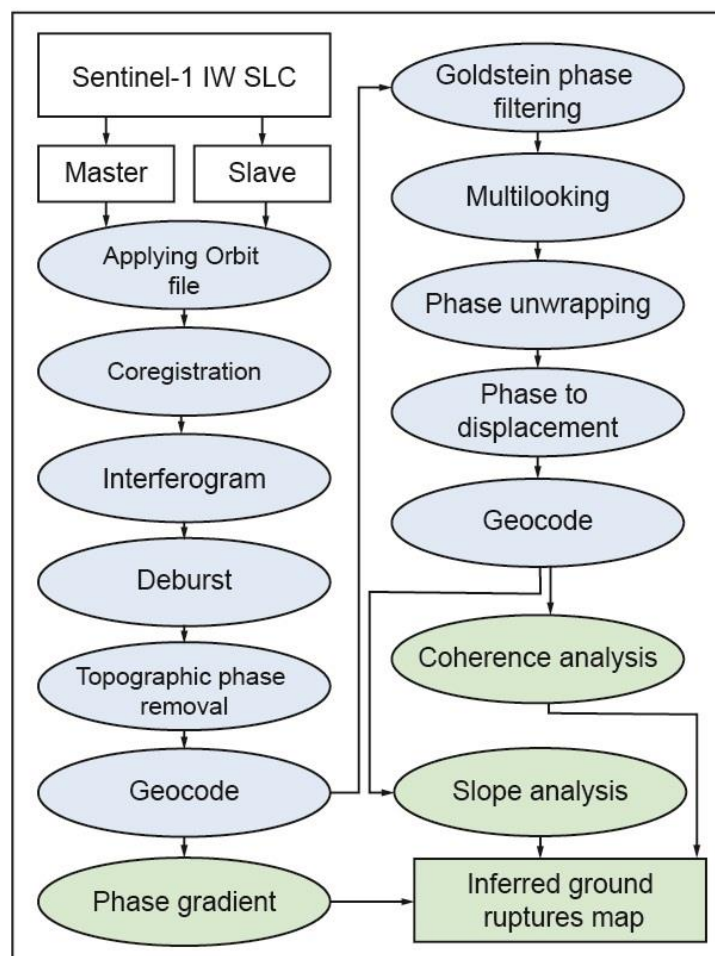


Fig. 3.1. Workflow per la creazione di un'interferogramma differenziale e l'analisi per l'individuazione della fratturazione cosismica.

L'output così ottenuto è un'interferogramma caratterizzato da una netta diminuzione della frequenza delle frange. Le frange residue sono connesse ai restanti contributi di fase, dati dall'atmosfera e da eventuali spostamenti. A volte è possibile rilevare anche la presenza di frange dovute a residui altimetrici, in relazione alla risoluzione del DEM utilizzato o ad errori contenuti in esso.

Per ridurre la rumorosità dei pixel, agli interferogrammi è stato applicato il filtro di *Goldstein* (Goldstein et al., 1998). Questo filtro rientra nella categoria dei filtri adattativi, ossia in grado di variare l'intensità del filtro in funzione della rumorosità dei pixel su cui si agisce. Questa modalità di filtraggio si adatta bene a scene che riprendono aree con coperture del suolo diverse tra loro, zone vegetate e aree urbanizzate, nelle quali la coerenza dei pixel assume valori molto diversi. Oltre a questo, tutti gli interferogrammi hanno subito un processo di *multilooking*.

Lo srotolamento della fase (*phase unwrapping*) è stato eseguito utilizzando l'algoritmo SNAPHU (*Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping*) (Chen & Zebker, 2000), ottimizzandone i parametri per evitare uno *smoothing* eccessivo dei valori di deformazione. La fase è stata convertita poi in valori di spostamento. Tutti i risultati sono stati poi proiettati in coordinate geografiche.

L'analisi successiva, per individuare e mappare le probabili rotture cosismiche, è stata condotta in ambiente GIS. Molte discontinuità sono state facilmente rilevabili direttamente dalla fase *wrapped* grazie all'elevata coerenza finale, soprattutto nel caso dell'Etna. Tuttavia, sono stati tentati diversi approcci per migliorarne l'individuazione. Ad esempio, le aree lineari caratterizzate da perdita di coerenza sono state riferite a possibili rotture cosismiche. In effetti, molte faglie coincidono con queste aree. Inoltre, il campo di deformazione è stato analizzato utilizzando tecniche di analisi morfologica (*slope map*). Questo approccio è risultato molto efficiente, tuttavia rimane suscettibile agli errori di *unwrapping*. Per questo motivo, è stato calcolato anche il gradiente di fase di ogni interferogramma, utilizzando direttamente i valori, reali e immaginari della fase interferometrica, seguendo il metodo suggerito da Price & Sandwell, 1998.

3.1.2.2. Analisi MT-InSAR

In questo studio sono state condotte due analisi multi-temporali utilizzando il pacchetto open source MintPy (*Miami INsar Time-series software in PYTHON*) (Yunjun, et al., 2019). Il software è composto da diversi script in Python, che insieme compongono un *workflow* efficace per la produzione di serie temporali da uno stack coregistrato di interferogrammi *unwrapped*. Il processo si compone di due fasi principali. Nella prima vengono corretti eventuali errori di *unwrapping*, per poi proseguire con l'inversione delle serie temporali grezze. Nella seconda, quest'ultime vengono corrette eliminando i contributi di fase provenienti da diverse fonti (per esempio l'atmosfera) per ottenere le serie temporali di spostamento e calcolare la velocità media. Il software include anche degli step opzionali, che possono essere effettuati o meno a seconda dei casi. Nella figura 3.2. è inserito un diagramma che illustra il procedimento seguito in questo studio.

Per condurre un'analisi multi-temporale con questo software è necessario disporre di uno stack di interferogrammi differenziali già srotolati. MintPy al momento supporta gli stack di interferogrammi prodotti dai software ISCE, GAMMA E ROI_PAC (Rosen et al., 2004, 2012; Werner et al., 2000).

Per questo lavoro lo stack utilizzato è stato creato con il software ISCE (*InSAR Scientific Computing Environment*), utilizzando il modulo Sentinel-1 TOPS *stack processor* sviluppato da Fattahi et al. 2017. L'utilizzo di MintPy è particolarmente promettente per applicazioni geologiche poiché interamente dedicato ai target distribuiti (DS). Infatti, le opzioni permettono di condurre analisi simili a SBAS ma con anche molteplici opzioni di personalizzazione. Per questo motivo è stato necessario creare uno stack composto da molti interferogrammi filtrati, formando un network ampiamente ridondante. Dati i valori molto contenuti di baseline spaziale caratterizzanti le acquisizioni Sentinel, il modo più semplice è stato quello di impostare la creazione di un'interferogramma tra ogni immagine e le tre (o quattro) successive, applicando un filtro Goldstein adattativo e un fattore di *multilooking* di 15 in range e 5 in azimut.

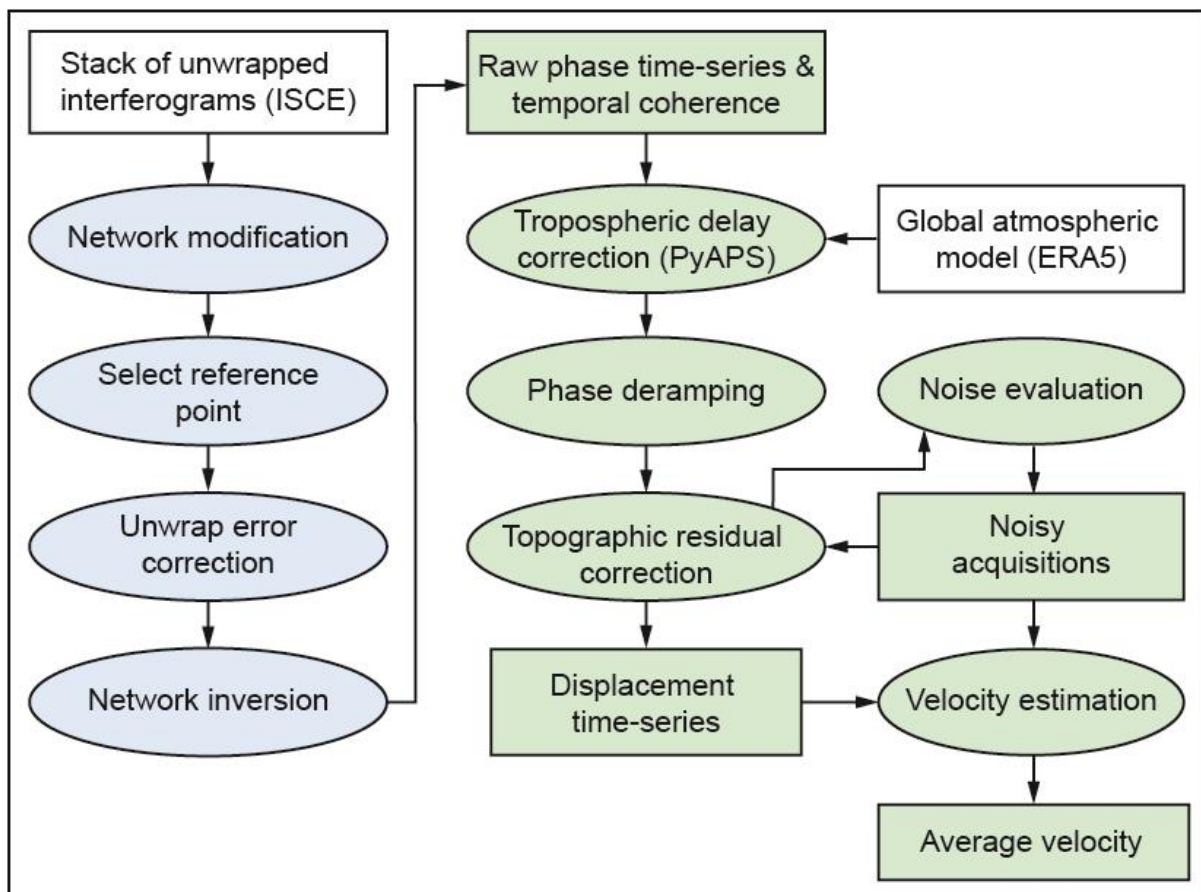


Fig. 3.2. Workflow per la creazione di serie temporali con il software MintPy. Ovali celesti: passaggi nel dominio degli interferogrammi. Ovali verdi: passaggi nel dominio delle serie temporali. Rettangoli bianchi: dati di input. Rettangoli verdi: dati di output.

Il *multilooking* è necessario per aumentare il rapporto segnale/rumore ma anche per ridurre i tempi di *unwrapping*. Tuttavia, ciò diminuisce irreversibilmente la risoluzione spaziale.

Durante il processing dei dati, il software MintPy procede in sequenza con i seguenti step: lettura degli interferogrammi e modificazione del network, determinazione del punto di riferimento comune, stima e correzione di eventuali errori di *unwrapping*, inversione del network di interferogrammi in serie temporali, calcolo della coerenza temporale, correzione del ritardo troposferico stratificato, rimozione delle rampe di fase, stima e correzione degli errori del DEM, stima della velocità media di deformazione.

Il software propone diversi approcci per modificare ed ottimizzare il network degli interferogrammi, ad esempio escludendo quelli caratterizzati da coerenza spaziale media inferiore ad un certo valore soglia, mantenendo però quelli facenti parti del cosiddetto MST (Minimum Spanning Tree) network, che garantisce la connessione completa della serie e la massima coerenza spaziale ottenibile (Perissin & Wang, 2012). In questo studio tuttavia si è scelto di utilizzare tutti gli interferogrammi prodotti. Per quanto riguarda il punto di riferimento, questo può essere scelto direttamente dal software tra quelli più stabili, con coerenza superiore

a 0.85. Per questo studio sono stati scelti dei punti di riferimento posizionati in aree notoriamente stabili.

Gli errori di *unwrapping* sono stati individuati e corretti con un algoritmo denominato *phase closure* (Yunjun et al., 2019).

Le serie temporali grezze sono state ricavate minimizzando la fase interferometrica residua invertendo il network di interferogrammi utilizzando un estimatore di tipo *weighted least square* (WLS), in italiano noto come metodo dei minimi quadrati, una tecnica matematica per effettuare una regressione lineare. L'opzione scelta per pesare l'inversione è stata quella di utilizzare l'inverso della covarianza (Tough et al., 1995; Guarnieri & Tebaldini, 2008), non applicando, prima dell'inversione, maschere di coerenza agli interferogrammi. Questo rappresenta una variazione rispetto all'algoritmo classico di SBAS (Berardino et al., 2002), che prevede l'applicazione di una maschera di coerenza spaziale.

La coerenza temporale è stata poi calcolata e utilizzata per generare una maschera volta a escludere i pixel con stima non affidabile delle serie temporali attraverso un valore soglia predefinito di 0.7 (Pepe & Lanari, 2006). La correzione del ritardo troposferico è stata applicata direttamente alle serie temporali con il modulo PyAPS3 (Jolivet et al. 2011, 2012) utilizzando i Global Atmospheric Models (GAMs) ERA-5 di ECMWF. Sempre a livello delle *time-series*, sono state stimate e corrette le rampe di fase, dovute sia a residui atmosferici che ad errori orbitali.

Gli errori del DEM vengono corretti tramite la tecnica proposta da Fattahi & Amelung, 2013. Per quanto riguarda la valutazione del rumore, per ogni acquisizione è stata stimata la fase residua e calcolato l'RMS (*Root Mean Square*). L'immagine con valore minimo viene scelta come data di riferimento, mentre quelle che superano un determinato valore di soglia possono essere eliminate (Fig. 3.3.). Infine, viene calcolata la velocità media di deformazione ed è possibile ottenere i prodotti geocodificati, cioè trasformati da coordinate radar a coordinate geografiche.

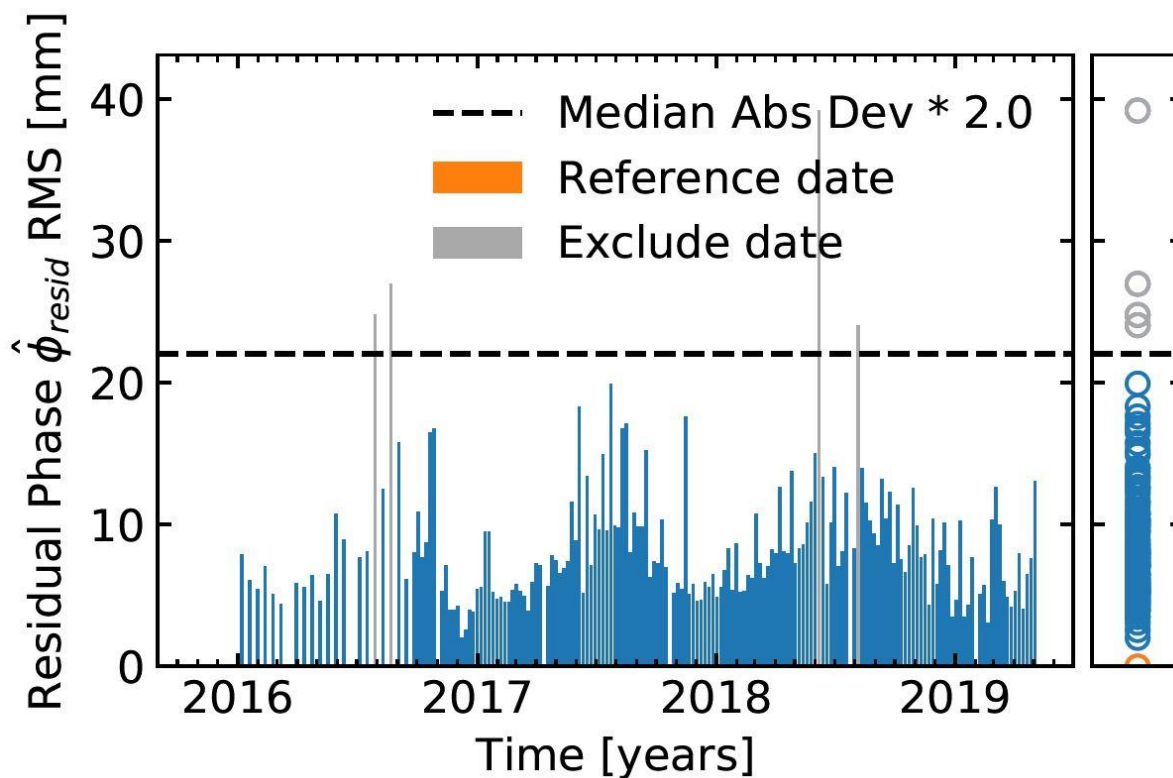


Fig. 3.3. Grafico contenente i valori di RMS di ogni immagine. Quelle che presentano valori oltre una determinata soglia vengono escluse mentre l'immagine con RMS minimo viene scelta utilizzata come riferimento.

3.1.3. La sequenza sismica in Italia centrale del 2016/2017

Da agosto ad ottobre 2016, fino a gennaio 2017, in Italia centrale, si è verificata una significativa sequenza sismica che ha avuto come area epicentrale i Monti Sibillini (Fig. 3.4.). Il 24 agosto, un terremoto di Mw 6.0 (Chiaraluca et al., 2017) ha colpito l'area compresa tra la città di Amatrice (provincia di Rieti) e Arquata del Tronto (provincia di Ascoli Piceno). Il meccanismo focale di questo evento mostra una cinematica da faglia diretta con direzione 155 N (Fig. 3.4.). In associazione a questo evento si è generata una serie di rotture superficiali cosismiche, in corrispondenza di alcune strutture estensionali, tra la dorsale nei Monti Sibillini e il Massiccio dei Monti della Laga, note come faglia di M. Gorzano (m 2458 s.l.m.) e M. Vettore (m 2476 s.l.m.) (Lavecchia et al., 2016). In particolare, è avvenuta la riattivazione di una porzione di circa 20 km della faglia diretta immergente a SW e nota come faglia del M. Vettore (Fig. 3.4.). Il terremoto del 26 ottobre Mw 5.9 (Chiaraluca et al., 2017), con epicentro nell'area di Visso (provincia di Macerata), a circa 30 km a nord-ovest dell'evento precedente di agosto, ha attivato un segmento più settentrionale della faglia diretta nell'area del M. Bove. Anche in questo caso la soluzione focale dell'evento mostra una cinematica che indica chiaramente un meccanismo distensivo direzionato N 162°. Nei giorni successivi a questo

evento, i rilevamenti sul terreno hanno permesso di riconoscere alcune fratturazioni superficiali con rigetti verticali dell'ordine di molti centimetri (5-10 cm) nell'area di Frontignano, Ussita e Cupi. L'estensione e la complessità morfologica dei luoghi non hanno permesso di effettuare sopralluoghi in tutte le aree potenzialmente interessate dalle rotture superficiali. L'evento del 30 ottobre Mw 6.5 localizzato nell'area di Norcia (provincia di Perugia), a cavallo tra gli epicentri degli eventi precedenti, ha riattivato le fratture cosismiche preesistenti, generandone anche di nuove, su di una estensione di oltre 40 km da Accumuli a SE fino a Muccia a NW. Questo evento enucleatosi a circa 7.5 km di profondità, con un rigetto all'ipocentro compreso tra 1.3 e 2.6 m (Chiaraluce et al., 2017), presenta una soluzione focale e una distribuzione delle repliche compatibili con la geometria di una faglia con direzione N 155, immergente a SW e con una inclinazione di circa 60° (Improta et al., 2019) (Fig. 3.4.). Questa corrisponde in superficie ad un sistema di faglie dirette dell'allineamento M. Vettore - M. Bove. La fratturazione superficiale prodottasi con questo evento sismico, si è sovrimposta a quella degli eventi precedenti e in molti casi non è possibile distinguere, soprattutto nell'area settentrionale del M. Bove, le fratture generate il 26 da quelle del 30 ottobre. Le rotture superficiali associate a questo evento sono state numerose, interessando un territorio molto vasto, che dalla Valle del F. Tronto a sud, raggiunge la Val di Chienti a Nord, estendendosi da Norcia fino ad Acquasanta Terme (Villani et al., 2018). Le fratturazioni superficiali presentano rigetti medi di molti decimetri, che hanno raggiunto valori di oltre 2 m nel versante occidentale del M. Vettore, dove a questi si è sommata anche una componente gravitativa (Huang et al., 2017).

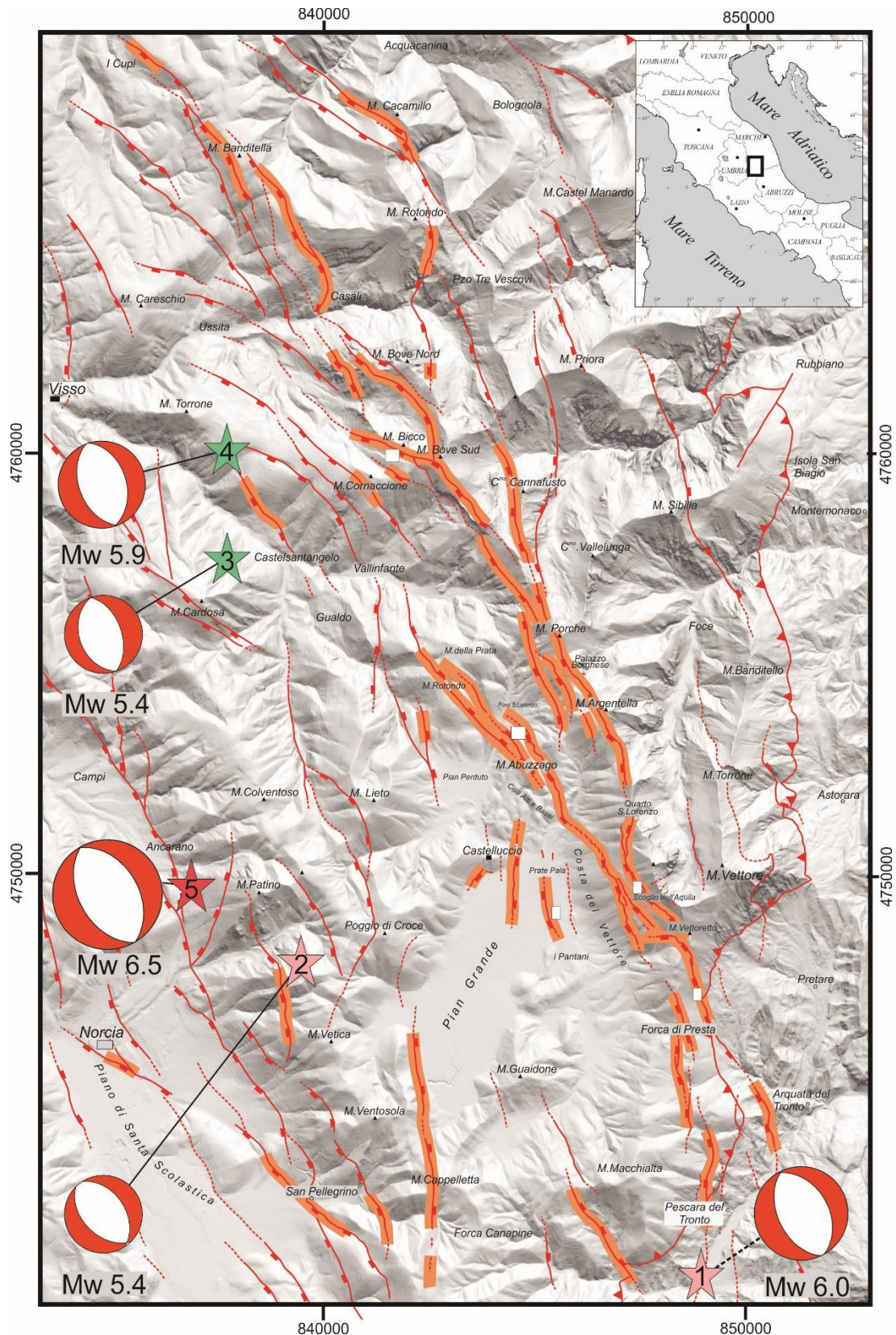


Fig. 3.4. Schema strutturale semplificato dei principali sistemi di faglie dirette Plio-Quaternarie (linee rosse con le barrette nella parte ribassata), del fronte di sovrascorrimento dei Monti Sibillini Mio-Pliocenico (linea rossa con i triangolini nella parte sovrascorsa). Sono evidenziate (arancione) le rotture cosismiche. Le stelle indicano gli epicentri degli eventi sismici principali del 2016 con $M > 5$, con associati i meccanismi focali TDMT (<http://cnt.rm.ingv.it/tdmt>): 1) 24/08/2016 Mw 6.0; 2) 24/08/2016 Mw 5.4; 3) 26/10/2016 Mw 5.4; 4) 26/10/2016 Mw 5.9; 5) 30/10/2016 Mw 6.5.

Per indagare gli effetti superficiali tramite l'interferometria SAR satellitare sono state processate quattro coppie di immagini Sentinel-1 IW SLC, relative ai due eventi principali (Amatrice e Norcia). Le coppie interferometriche appartengono, in entrambi i casi, all'orbita discendente 22 e all'orbita ascendente 117, acquisite immediatamente prima e dopo il rispettivo evento. Nell'immagine seguente (Fig. 3.5) è riportato uno degli interferogrammi prodotti, in questo caso relativo all'evento di M 6.5. Osservando gli interferogrammi relativi all'area dei Monti Sibillini interessata dagli eventi sismici, la deformazione cosismica risulta distribuita in direzione N-S su di un'area di circa 1300 km², con gli assi maggiori di circa 55 km da Amatrice a Muccia e circa 45 km tra Roccafluvione e Cerreto di Spoleto. Considerando la struttura estensionale immergente a SW del M. Vettore – M. Bove, la deformazione si estende per circa 15 km nel letto e 30 km nel tetto della faglia diretta.

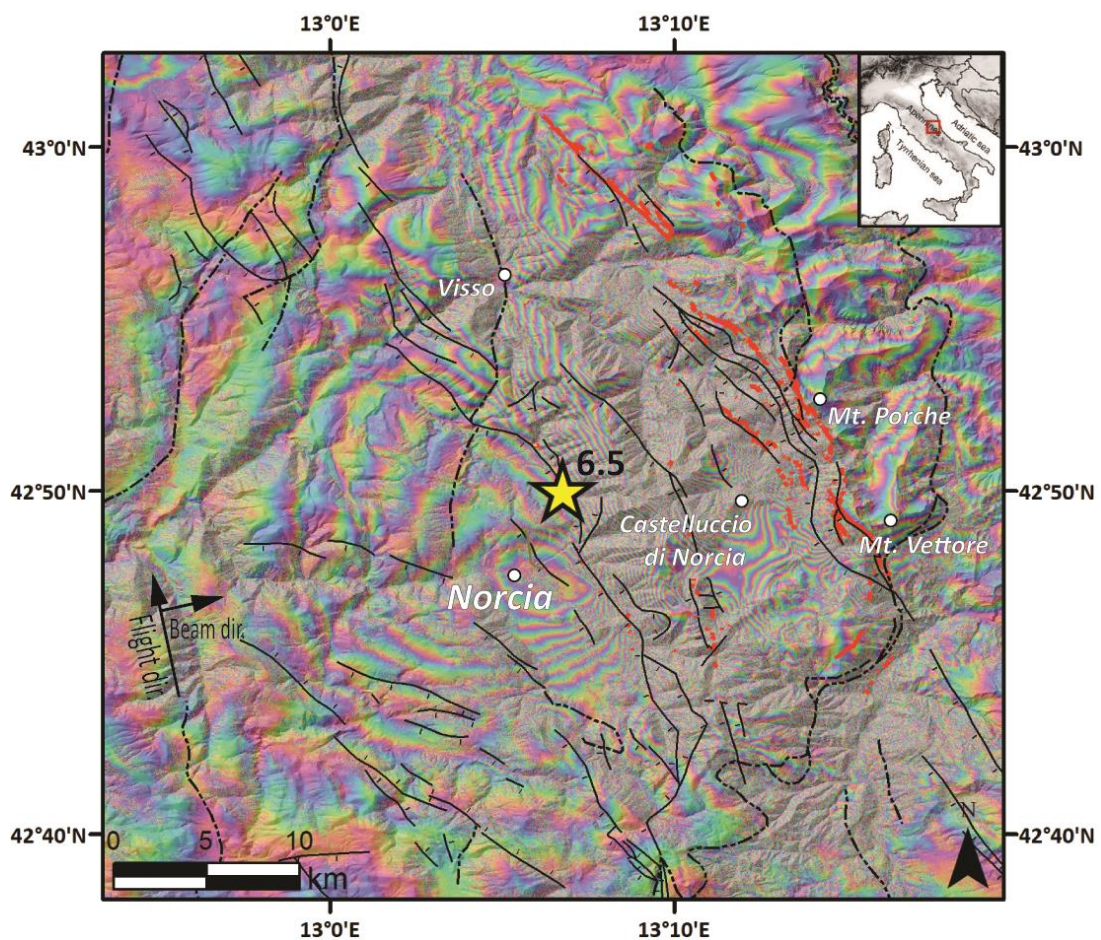


Fig. 3.5. Interferogramma Sentinel-1 (orbita ascendente 117) relativo allo spostamento cosismico del terremoto di Norcia (Mw 6.5). Sono riportati i principali lineamenti tettonici: faglie normali (linee nere) e sovrascorrimenti (linee tratteggiate). Le principali rotture cosismiche sono indicate in rosso.

L'interferometria differenziale fornisce una stima dello spostamento relativo della superficie terrestre lungo la linea di vista, obliqua, del satellite (LOS). In base ad alcuni presupposti, le acquisizioni con diversa geometria possono essere combinate al fine di misurare la componente

verticale e orizzontale del movimento. Gli interferogrammi prodotti, srotolati e con fase convertita in spostamento, sono stati importati in ambiente GIS. Attraverso uno strumento di calcolo raster è stato velocemente possibile, conoscendo i rispettivi angoli di incidenza e azimuth LOS, combinare le rispettive acquisizioni ascendenti e discendenti. In questo caso, per estrarre quelle che potevano essere le rotture cosismiche, lo studio si è concentrato sulla componente verticale del movimento (Up-Down) poiché questa sembra evidenziare meglio le discontinuità, conservando i dati di entrambe le acquisizioni. Le mappe di deformazione così ottenute sono inserite nella figura seguente (Fig. 3.6.). Lo step finale per l'individuazione delle rotture cosismiche è avvenuto calcolando una *slope map*, filtrando il risultato per valori di inclinazione maggiori di 45° . Questo per eliminare il più possibile, rumore, errori di unwrapping e problemi derivanti dal DTM di riferimento.

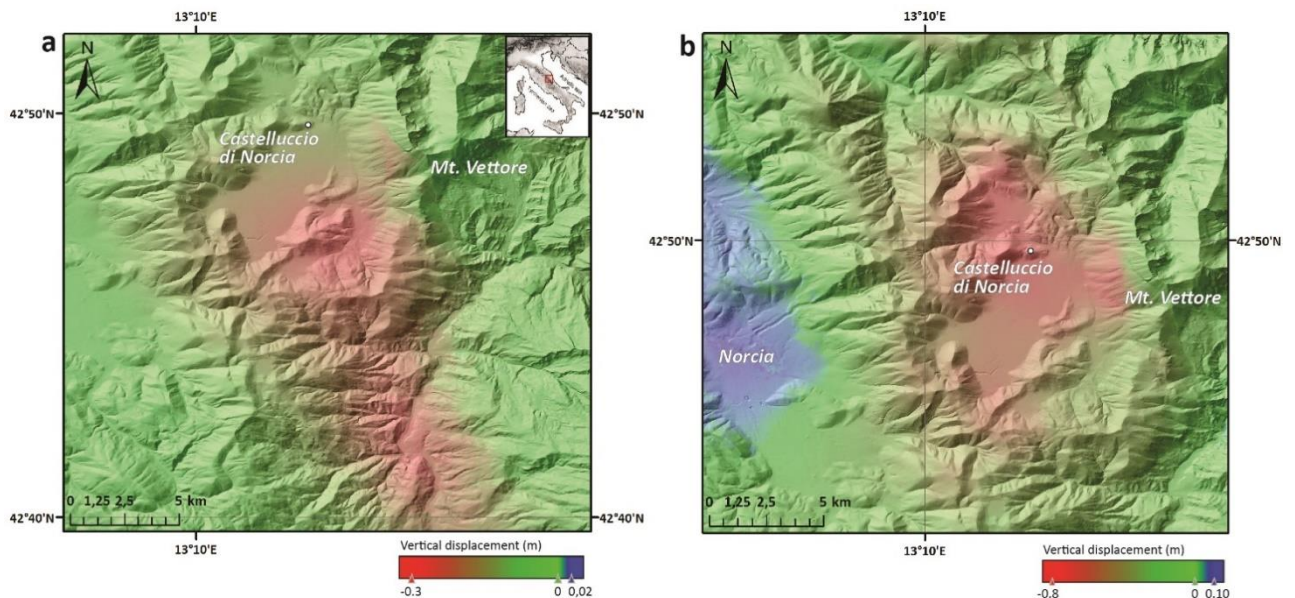


Fig. 3.6. Mappe D-InSAR che mostrano lo spostamento verticale cosismico del terremoto di Amatrice (a) e del terremoto di Norcia (b). Queste mappe sono ricavati combinando, in ambiente GIS, i valori di spostamento lungo la linea di vista del satellite degli interferogrammi ascending e descending.

Durante la sequenza sismica, gli effetti cosismici hanno interessato in particolare l'area della pianura di Castelluccio di Norcia e i settori del Monte Vettore - Monte Porche - Monte Bove (Fig. 3.7.). Come detto precedentemente, sono considerate probabili rotture cosismiche, quelle dedotte dalle mappe di gradiente aventi una pendenza superiore a 45 gradi. Queste sono inserite nella figura 3.8. come linee gialle e rosse. Le linee gialle sono quelle relative al primo evento di Amatrice mentre quelle rosse all'evento di Norcia. Le rotture rilevate nelle campagne di rilievo sul campo dell'Università di Urbino (Menichetti et al., 2017) sono tracciate con una linea blu.



Fig. 3.7. Rotture cosismiche: **a)** piano di faglia con contatto roccia/detrito di falda; **b-b')** piano di rottura in roccia prima e dopo l'evento sismico; **c)** piano di rottura sul suolo; **d)** frattura del piano stradale lungo la SP 477, 1 km a valle di Forca di Presta, successiva all'evento del 24 Agosto 2016.

Le discontinuità estratte dagli interferogrammi possono rappresentare indistintamente sia l'effettiva fagliazione superficiale del terreno, che eventuali scarpate di frana di neoformazione. I risultati Sentinel relativi all'evento Amatrice evidenziano abbastanza accuratamente la deformazione avvenuta lungo il fianco occidentale del Monte Vettore. Qui gli effetti superficiali del sisma sono oltre 5 km di rotture del terreno, allineate lungo il noto sistema di faglie distensive del Monte Vettore. La *slope map* calcolata sui valori di spostamento verticale mostra chiaramente una discontinuità che, a partire dal passo di Forca di Presta, sale ai lati del monte Vettore e supera, per più di un chilometro, l'affioramento roccioso noto come "Scoglio dell'Aquila". Le stesse rotture si sono riattivate in seguito all'evento principale di Norcia insieme a un complesso pattern di fagliazione superficiale composto da faglie sintetiche e antitetiche spesso subparallele ma anche intersecanti fra loro.

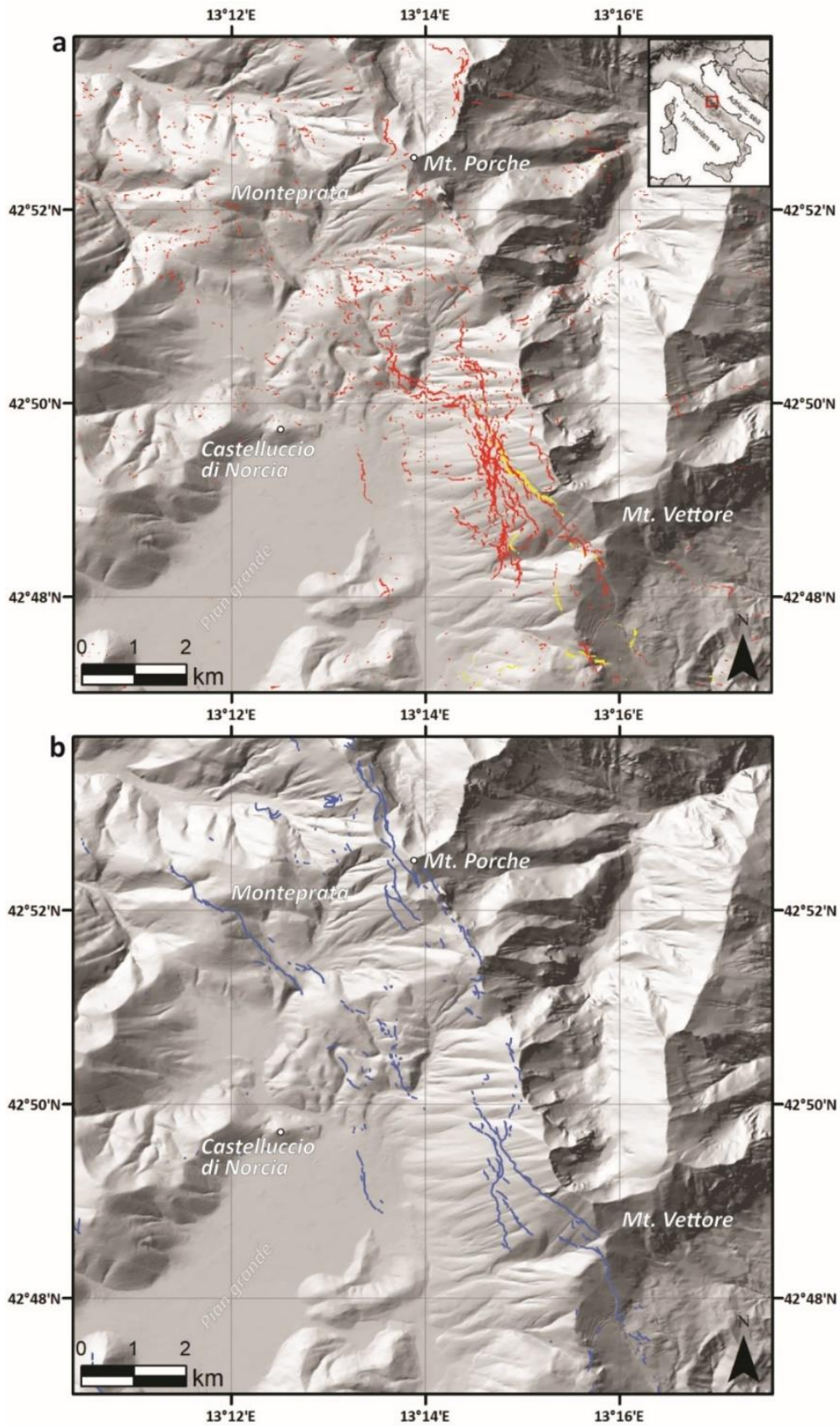


Fig. 3.8. Rotture cosismiche nell'area di Castelluccio di Norcia e del Monte Vettore. **a)** Slope map ottimizzata. Le discontinuità gialle sono relative all'evento Amatrice mentre quelle rosse sono relative all'event di Norcia Mw 6.5; **b)** Mappa delle rotture cosismiche rilevate sul campo dell'Università di Urbino (Menichetti et al., 2017).

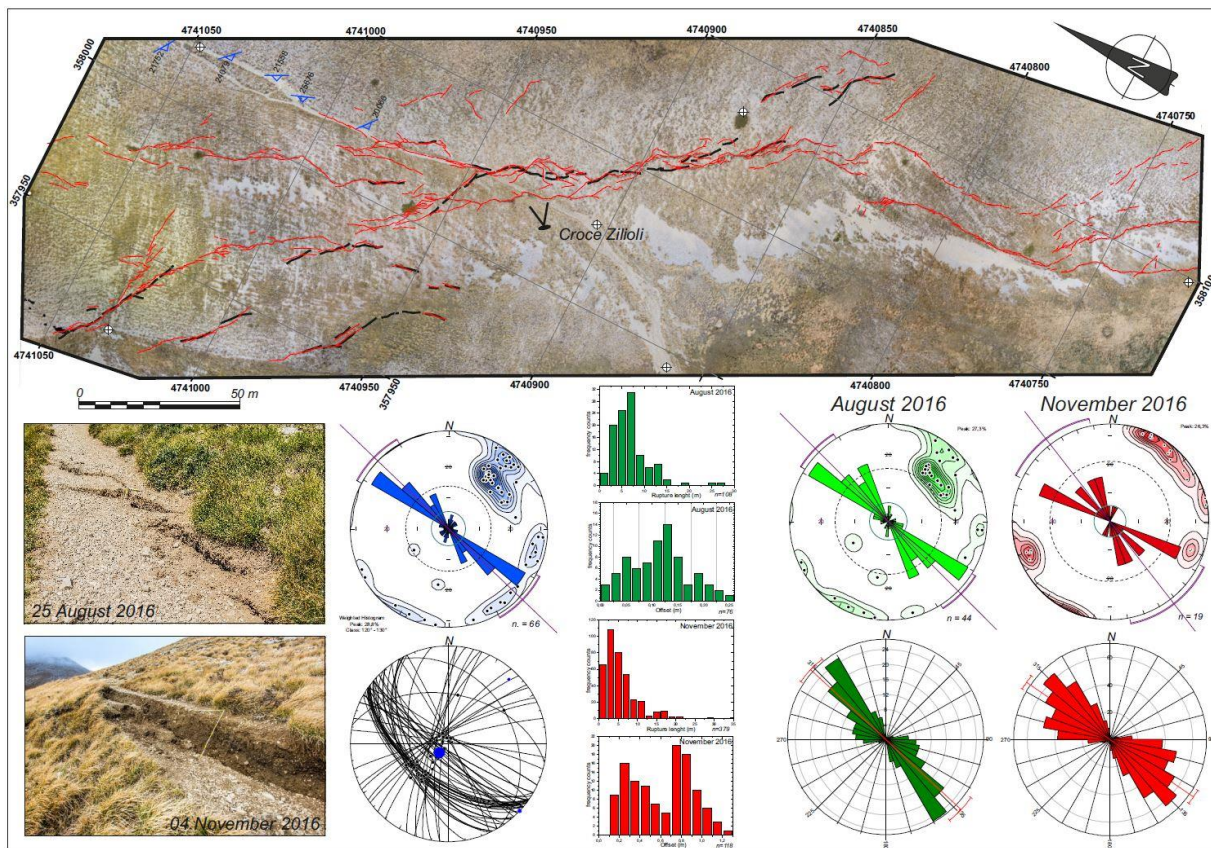


Fig. 3.9. Rotture cosismiche dell'area sottostante al Monte Vettore. È possibile notare il pattern di deformazione abbastanza complesso, in parte creatosi in corrispondenza del terremoto di Amatrice, per poi riattivarsi in seguito all'evento di Norcia.

La *slope map* (Fig. 3.8.) evidenzia con chiarezza l'allineamento continuo con direzione NW-SE delle rotture lungo il fianco occidentale del Monte Vettore e parzialmente, in piccoli segmenti, quelli nei settori più settentrionali. I risultati relativi all'evento del 30 ottobre appaiono ben più rumorosi di quelli di Amatrice. Ciò è dovuto alla maggiore deformazione e a diverse piccole deformazioni locali riferibili probabilmente a movimenti gravitativi. È possibile identificare chiaramente la lunga rottura ai piedi del Monte Vettore, nella piana di Castelluccio, responsabile della rottura di una strada. Gli spostamenti lungo la cresta del complesso del Monte Vettore sono anch'essi ben identificati, nonché una porzione ridotta dello *splay* antitetico di Montepetra. Altre possibili rotture, corrispondenti a lineamenti tettonici noti, sono identificati. I risultati corrispondono abbastanza bene ai dati rilevati su terreno (Fig. 3.7., 3.8. e 3.9.). Da un punto di vista metodologico, questo approccio consente di ottenere una rapida mappa preliminare delle possibili rotture del terreno e delle relative strutture minori.

Per quanto riguarda l'analisi multi-temporale, il workflow discusso nella sezione precedente è stato applicato ad un dataset di immagini Sentinel-1 con orbita ascendente (track 44). Il periodo analizzato va da gennaio 2016 a fine aprile 2019, per un totale di 172 acquisizioni. Per coregistrare le immagini è stato utilizzato lo *stack processor* sviluppato da Fattahi et al., 2016

implementato in ISCE (Rosen et al., 2012) con la quale sono stati anche prodotti gli interferogrammi. Ogni immagine è stata accoppiata con le quattro successive (network sequenziale). In questo modo è stato creato un network ridondante di 690 interferogrammi (Fig.3.9.)

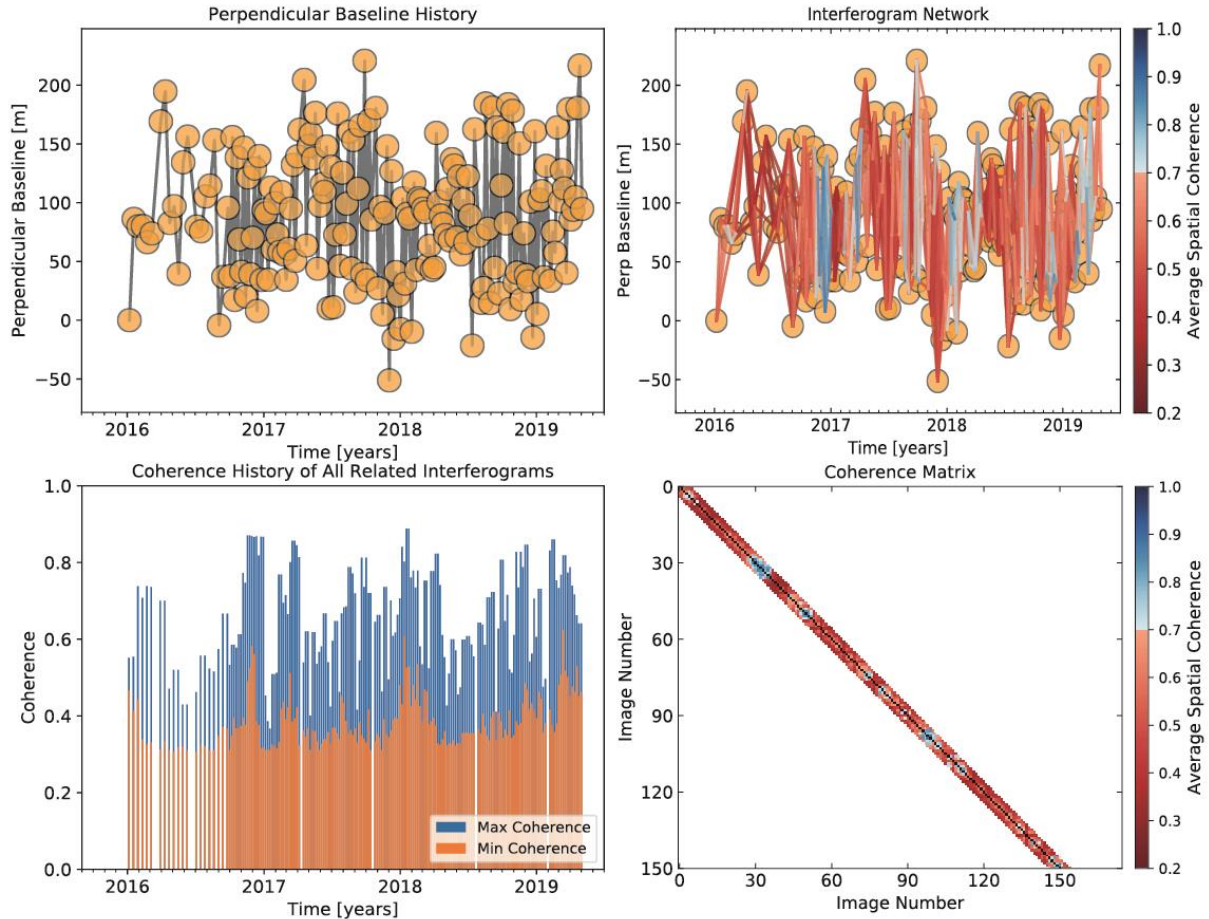


Fig. 3.10. Caratteristiche dello stack utilizzato nell'analisi. In alto è rappresentato il network di interferogrammi in relazione alle baseline normale e temporale. In quelle sottostanti sono inserite le caratteristiche di coerenza.

I prodotti finali consistono in una mappa della velocità media annuale e nelle serie temporali di deformazione.

Il pattern di deformazione ricalca quello mostrato dagli interferogrammi cosismici. Questo soprattutto nell'area Norcia-Monte Vettore, dove è chiaramente visibile la cinematica a due faglie, sintetica (Monte Vettore) e antitetica (Norcia), che ha portato allo sprofondamento della piana di Castelluccio e al movimento verso ovest dell'area di Norcia.

La coerenza finale ottenuta è abbastanza buona. Tuttavia, data la natura montuosa dell'area, che presenta aree fortemente vegetate ed è soggetta a frequenti nevicate, molti pixel non raggiungono valori di coerenza per essere considerati sufficientemente affidabili (almeno 0.7).

Le informazioni più interessanti derivano dalla lettura delle serie temporali, che permettono di osservare l'evoluzione delle deformazioni nel tempo. Un esempio è inserito nell'immagine seguente (Fig. 3.11.).

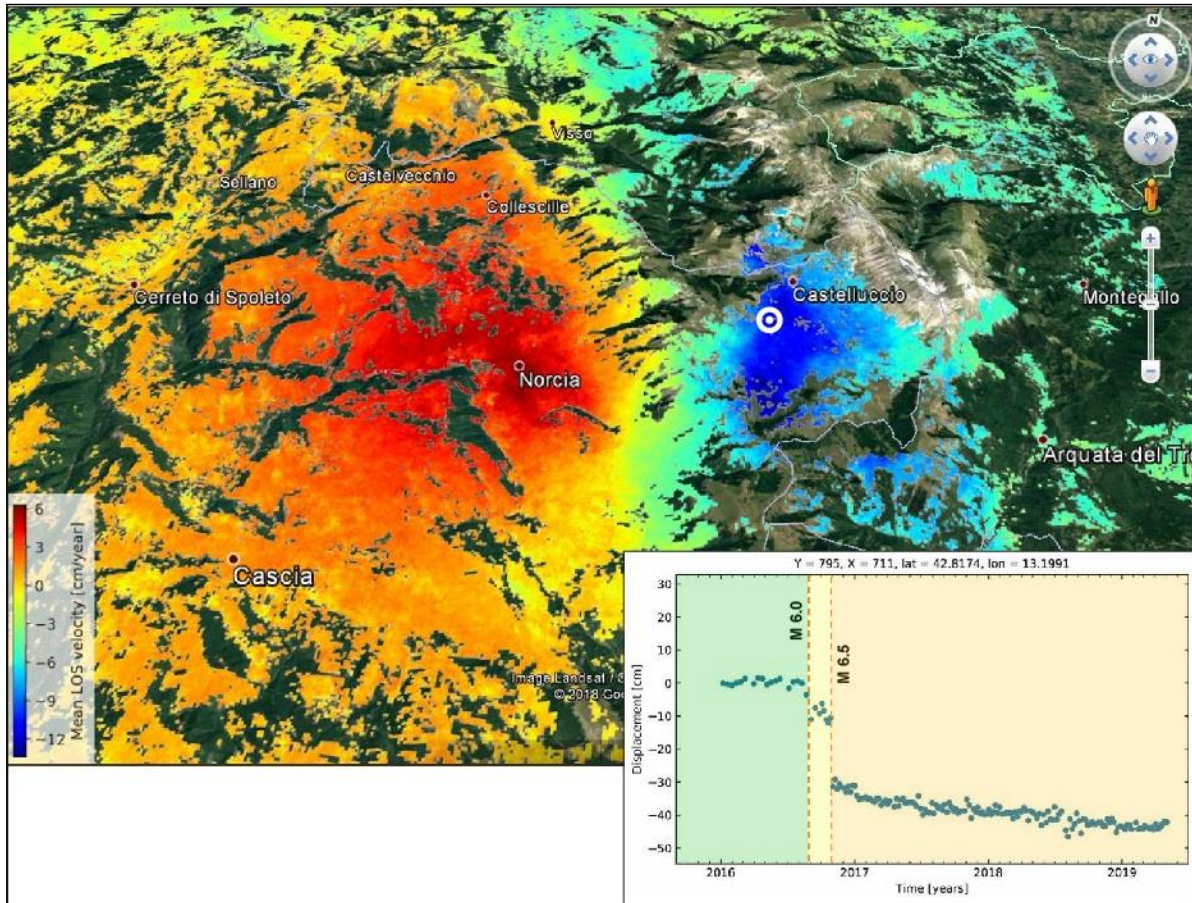


Fig. 3.11. Mappa di velocità media annuale dell'area di Norcia e del Monte Vettore. Nell'angolo in basso a destra è inserita la serie temporale di un pixel localizzato all'interno della piana.

Osservando la serie temporale riportata nell'immagine è possibile individuare con facilità sia la deformazione avvenuta in concomitanza del terremoto di Amatrice, sia con quello di Norcia. Tuttavia, la storia deformativa di questo pixel, localizzato nella piana di Castelluccio, contiene tre aspetti ugualmente molto interessanti. Infatti, come prima cosa è possibile notare che prima dell'evento di agosto 2016, l'area non presentava deformazioni pregresse di alcun tipo. Invece, immediatamente dopo l'evento si è innescata una fase di rilassamento post-sismico abbastanza pronunciata (più di 5 cm). Questa ha proseguito fino all'evento maggiore (M 6.5), seguita poi da una analoga e prolungata fase di rilassamento, meno pronunciata della prima, che ha proseguito fino ai primi mesi del 2019.

3.1.4. Il terremoto etneo del 26 dicembre 2018

L'Etna è il vulcano attivo più alto d'Europa. Si trova in posizione inusuale rispetto alla geodinamica del Mediterraneo centrale, una regione caratterizzata dalla convergenza tra le placche africana ed eurasiatica. Il vulcano attualmente possiede un'elevazione di 3326 m sul livello del mare, coprendo un'area di 1190 km² con una circonferenza di base di 140 km. L'inizio dell'attività vulcanica all'Etna è di circa 500000 anni fa, principalmente con eruzioni sottomarine, sebbene l'inizio della costruzione dell'attuale edificio risalga a 200000 anni a seguito dell'alternanza di eruzioni esplosive ed effusive. Attualmente l'attività vulcanica viene svolta principalmente con attività debolmente esplosiva e abbondanti flussi di lava. Il comportamento sismotettonico del fianco orientale del Monte deve essere inquadrato nell'instabilità generale di questo settore dell'edificio vulcanico. Studi strutturali, morfologici e geofisici suggeriscono, infatti, che il fianco orientale del Monte Etna si stia muovendo verso mare (Azzaro et al., 2013; Mattia et al., 2015, De Guidi et al., 2018). La cinematica di questo processo è controllata da numerosi blocchi cinematici (Bruno et al., 2012) delimitati da sistema di strutture tettoniche attive denominate "faglie delle Timpe". La riattivazione sismogenetica di queste strutture può essere influenzata dall'improvvisa risalita di dicchi magmatici (Bonaccorso et al., 2002) che possono scatenare terremoti a causa del trasferimento di stress (Bonanno et al., 2011). Oltre a questo, anche i fluidi di origine vulcanica e la loro interrelazione con le falde acquifere svolgono un ruolo dominante nell'instabilità su larga scala del fianco orientale del Monte. Etna. Il sistema delle Timpe è caratterizzato da almeno 20 segmenti di faglia (Lo Giudice & Rasà, 1992; Monaco et al., 1997, 2010; Azzaro et al., 1999; 2004; 2012; Branca et al., 2011) che interessano la settore orientale del vulcano. Oltre l'80% dei terremoti avviene al di sopra dei 5 km di profondità e la magnitudo raramente superiore a 4 (Gresta et al., 1998). Questi tuttavia, nonostante basse magnitudo, possono produrre effetti distruttivi (intensità macrosismica epicentrale fino a IX) in un'area molto stretta, spesso accompagnata da fratture superficiali cosismiche (Azzaro et al., 1989; Lo Giudice & Rasà, 1992; Gresta et al., 1997). Tra queste strutture, la faglia denominata Fiandaca con direzione NW-SE (Azzaro, 1999) è di grande importanza dal punto di vista sismotettonico, poiché la sua recente riattivazione ha dato origine a uno dei più forti terremoti mai registrati sul Monte. Etna (26 dicembre 2018; M 4.8) che ha danneggiato aree fortemente urbanizzate. Questo evento ha seguito di poche ore un evento eruttivo nell'area sommitale ed è stato seguito dalla riattivazione di altre strutture tettoniche sul fianco orientale del vulcano.

Come nel capitolo precedente, l'interferometria satellitare è stata utilizzata anche come ausilio al rilevamento geologico delle rotture cosismiche. Sono state elaborate due coppie

interferometriche di immagini Sentinel-1 IW *single look complex* (SLC) dall'orbita discendente 124 e dall'ascendente 44.



Fig. 3.12. Rotture cosismiche relative al terremoto etneo del 2018. **a)** Analisi di dettaglio della deformazione distribuita lungo la Fiandaca. **b, c, d)** Fotografia, DEM ed ortofoto di una delle rotture più grandi e note avvenute lungo la Fiandaca; **e)** Deformazioni di tipo compressivo; **f, g)** Rotture più o meno pronunciate del manto stradale in corrispondenza di alcuni lineamenti tettonici.

Le acquisizioni coprono il periodo immediatamente pre e post sismico, dal 22 al 28 dicembre 2018. L'elaborazione interferometrica evidenzia, con buon dettaglio, un complesso campo di deformazione che interessa l'intero edificio vulcanico (Fig.3.10.). L'area sommitale è stata interessata dallo spostamento dovuto all'ascesa del magma, che ha raggiunto più di 40 cm e 65 cm rispettivamente lungo le direzioni O ed E.

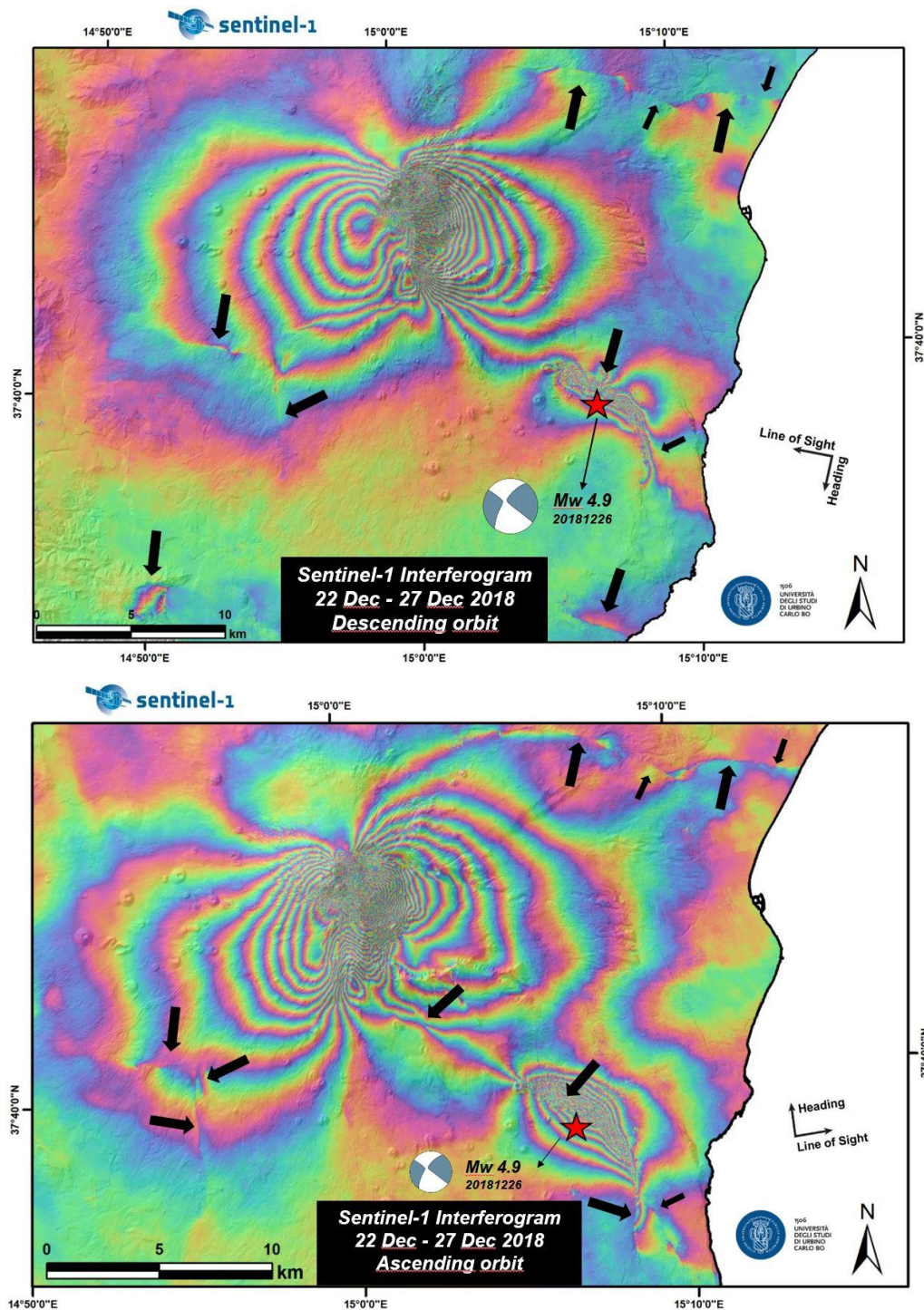


Fig. 3.13. Interferogrammi relativi al terremoto etneo del 2018. Con le frecce sono indicati i lineamenti più evidenti, mentre con la stella rossa è indicato l'epicentro del terremoto.

Lo slip cosismico in corrispondenza della faglia di Fiandaca ha raggiunto i 15 cm verso est e 20 cm verso ovest. Deformazioni di minore entità sono rilevabili anche lungo le altre faglie che attraversano i versanti orientale e meridionale del vulcano, dove si è verificato del movimento asismico durante l'intervallo di tempo dell'interferogramma.

La maggior parte delle discontinuità sono facilmente visibili direttamente dalla fase *wrapped* grazie all'elevata coerenza che caratterizza l'area. Tuttavia, per agevolarne l'individuazione, sono stati tentati diversi approcci. Ad esempio, sono state considerate come probabili rotture cosismiche le aree, con geometria lineare, caratterizzate da una netta perdita di coerenza. In effetti, ci sono molti esempi di linee di faglie che coincidono con queste aree. Oltre a questo, è stata realizzata una *slope map*, analizzando il campo di deformazione come fosse un DEM morfologico. Questo approccio è molto efficiente; tuttavia, è suscettibile agli errori di unwrapping. Infine, è stato condotto un calcolo del gradiente di fase, calcolato direttamente dalla fase complessa degli interferogrammi usando l'espressione usata da Price & Sandwell, 1998. Nel complesso questo tipo di analisi multi-approccio è abbastanza rapido ed efficace da eseguire, alcuni esempi sono mostrati nella Fig.3.9.

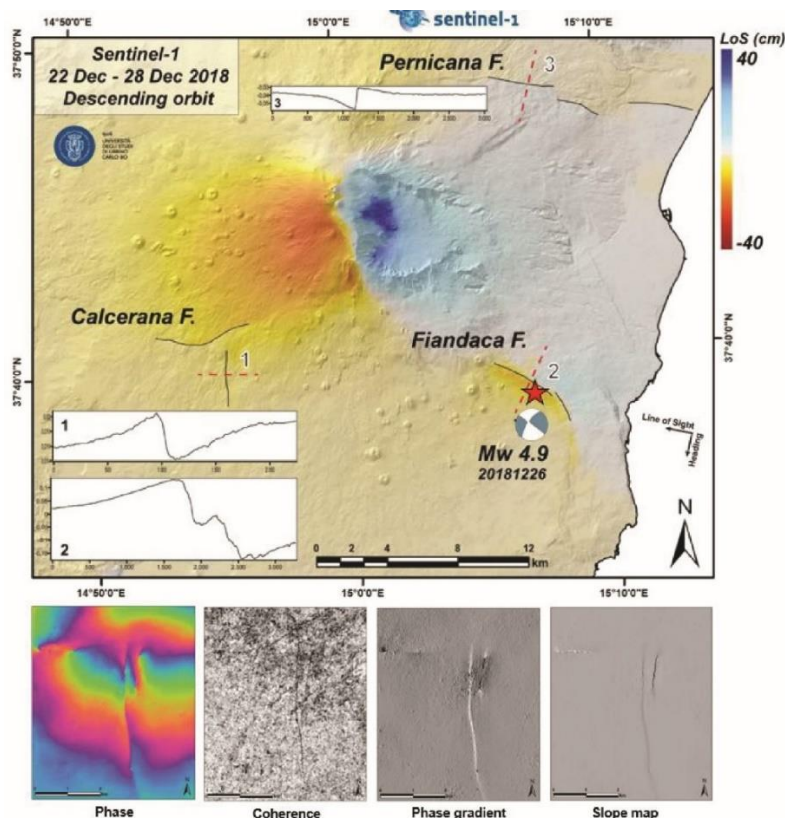


Fig. 3.14. Nell'immagine in alto viene inserito il campo di deformazione ricavato dallo srotolamento dell'interferogramma discendente. Tramite la creazione di alcuni profili è possibile vedere lo spostamento differenziale lungo le faglie maggiori. In basso invece viene inserito un close up sulle faglie dell'area di Calcerana-Ragalna. Sono riportati i vari modi nei quali è possibile ottenere una visione migliore delle discontinuità.

I risultati evidenziano il complesso pattern di deformazione dato dalle rotture al suolo lungo la faglia di Fiandaca, dove, tuttavia, si nota anche una forte decorrelazione dovuta al movimento cosismico. Le altre faglie minori hanno subito un lento movimento asismico durante tutto il periodo della sequenza, registrato in gran parte dagli interferogrammi. Ad esempio, è possibile delineare con un buon dettaglio la faglia di Pernicana, così come la diramazione nella porzione meridionale della faglia Fiandaca-Pennisi. Stessa cosa per il sistema di faglie di Belpasso e Ognina.

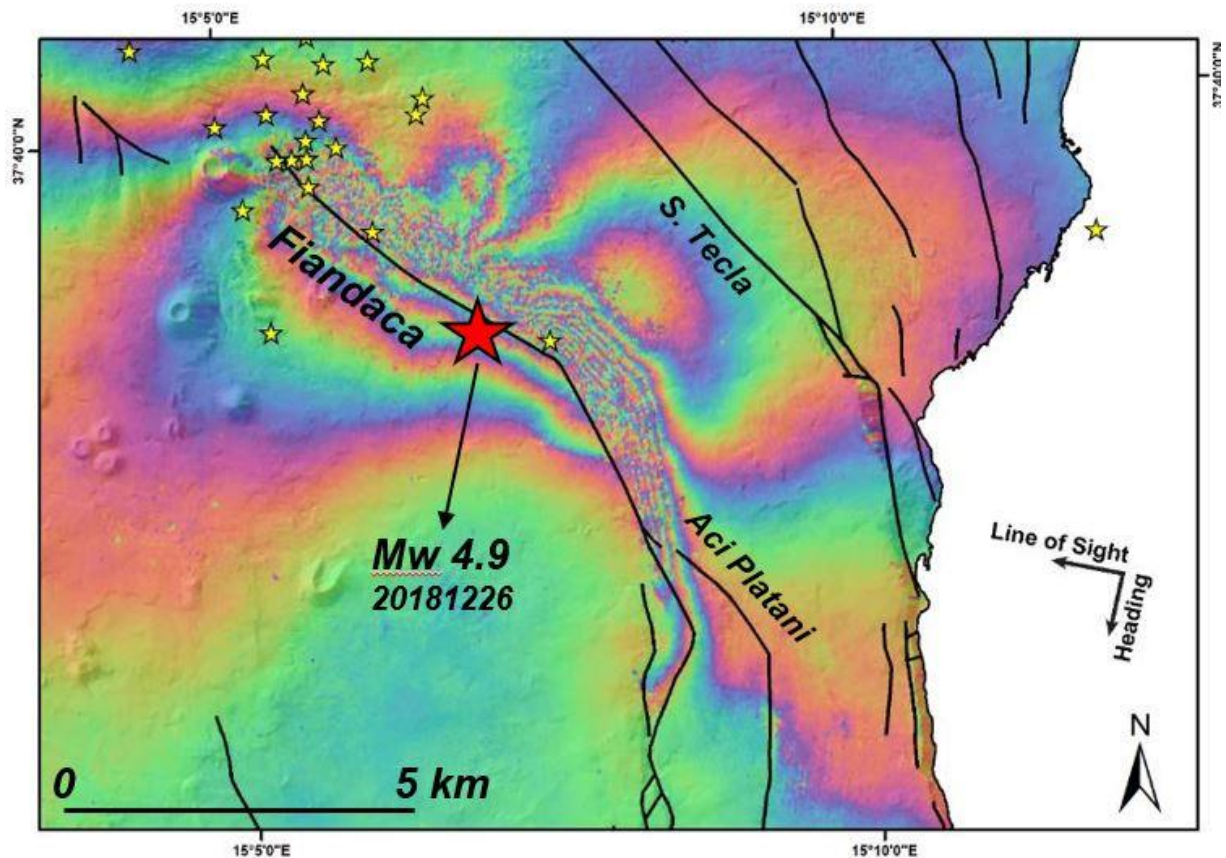


Fig. 3.15. Close up dell'interferogramma discendente centrato sulla faglia di Fiandaca Pennisi. Sono indicati sia il main shock (stella rossa) che gli eventi minori.

I dati interferometrici illustrano in dettaglio l'attività di queste faglie in relazione all'eruzione. I risultati presentano una risoluzione e una continuità spaziale talmente buone che possono essere facilmente utilizzati per migliorare con precisione le carte geologiche. Inoltre, lungo queste discontinuità, sono state rilevate nuove fessurazioni, che hanno interessato soprattutto il manto stradale, proprio in corrispondenza di faglie minori, come quella che attraversa la zona di Capo Mulini.

Anche in questo caso si è proceduto ad un'analisi DS (*Distributed Scatterers*) multi-temporale utilizzando il software MintPy. In totale sono state utilizzate 76 immagini per l'orbita ascendente e 75 immagini per l'orbita discendente. L'arco temporale preso in analisi va da

gennaio 2018 ad aprile 2019. In questo modo è stato possibile analizzare il comportamento delle strutture attive sia prima dell'evento sismico di dicembre 2018 che dopo. Anche per questa analisi sono stati prodotti numerosi interferogrammi (più di 500), ottenendo dei network ridondanti, necessari per l'analisi dei target distribuiti. Potendo avere a disposizione entrambe le orbite, è stato possibile scomporre la velocità media nella componente verticale ed orizzontale. Le serie temporali invece sono utili per comprendere la dinamica post evento. Nell'immagine seguente sono inserite le caratteristiche del dataset (Fig. 3.14.).

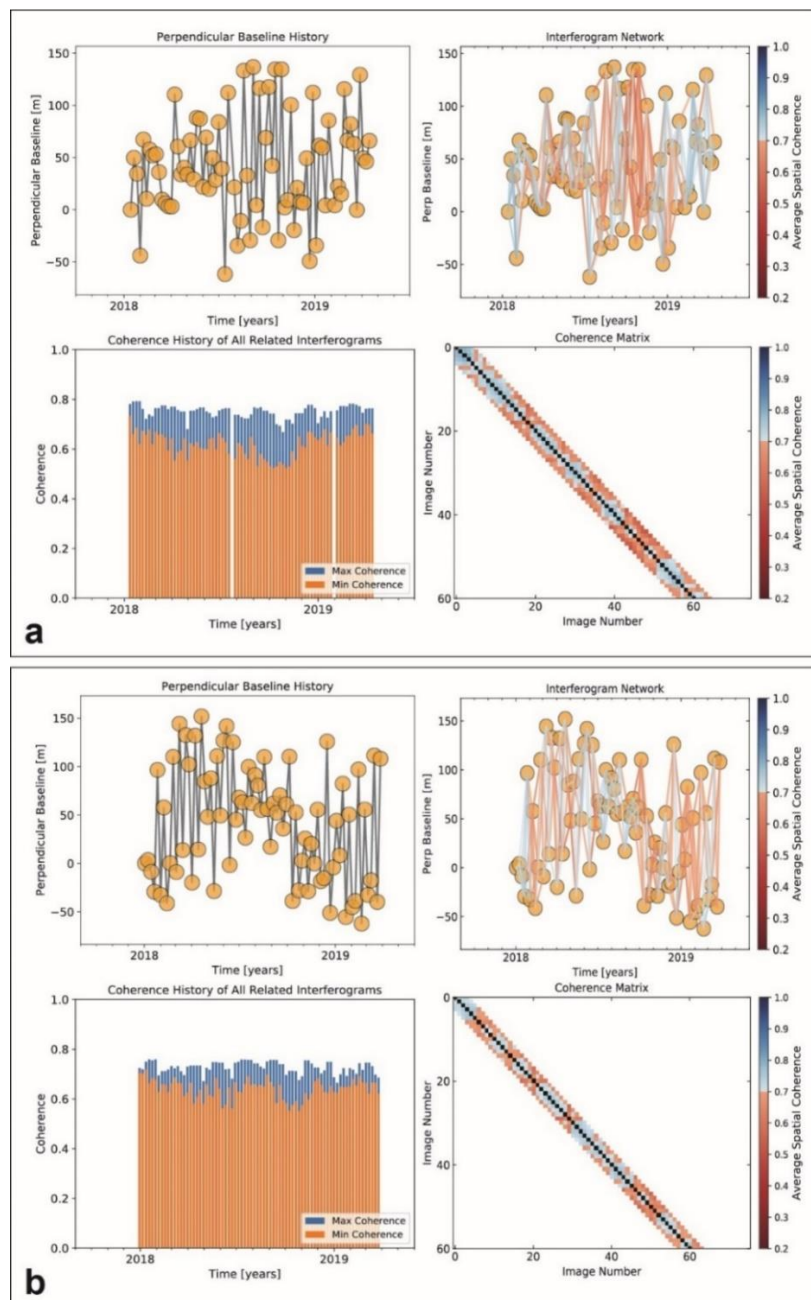


Fig. 3.16. Caratteristiche degli stack utilizzati nell'analisi. Sono rappresentati il network di interferogrammi in relazione alla coerenza spaziale e alle baseline normale e temporale. In quelle sottostanti sono invece inserite le caratteristiche di coerenza; **a)** Ascending; **b)** Descending.

Come risultato principale dell'analisi multi-temporale sono state inserite nell'immagine seguente le mappe di velocità media annuale suddivise in movimento orizzontale e verticale (Fig. 3.15.). Queste sono state prodotte combinando i valori di deformazione lungo la linea di vista del satellite, in orbita ascendente e discendente. Si tratta di un dato indicativo, in relazione al punto di riferimento, posizionato in corrispondenza della sede dell'INGV di Catania. Qui è presente una stazione GPS permanente che conferma la stabilità dell'area. Naturalmente, il dato di velocità annuale è sovrastimato, poiché include anche la deformazione cosismica (movimento non lineare) di dicembre 2018. Le mappe sono state riproiettate, dalle originali coordinate radar, a quelle geografiche. Tutti i pixel presentano valori di coerenza superiori a 0.7. L'unica area che non presenta pixel coerenti corrisponde a quella sommitale del vulcano. Questo è dovuto alla natura sabbiosa dei terreni e alla neve, presente per molti mesi l'anno. Tuttavia, la coerenza raggiunta è ottimale per individuare e stimare l'entità dei movimenti. Queste rappresentazioni grafiche sono particolarmente efficaci e forniscono informazioni immediatamente intelleggibili sulla geometria e dinamica delle deformazioni. Infatti, è chiaramente visibile il fenomeno di *lateral spreading*, con cinematica est-ovest, che interessa ampie porzioni dell'edificio vulcanico e che ha subito un'accelerazione in seguito alla risalita del dicco magmatico che portato all'eruzione, e poi al terremoto, del dicembre 2018. Confrontando le due mappe, si può intuire, almeno per il breve arco temporale analizzato, la generale preponderanza dei movimenti orizzontali rispetto a quelli verticali. Le aree ai limiti della mappa che presentano, apparentemente, deformazione possono essere movimenti franosi o residui atmosferici che richiedono maggiori analisi. Si riescono ad individuare con buona chiarezza alcune faglie lungo le quali si distribuisce il movimento verso mare del versante orientale dell'edificio vulcanico. Queste sono la faglia Pernicana a nord, che presenta un moderato movimento asismico e la Fiandaca, più a sud, dove invece viene registrato un netto movimento speculare delle parti, dovuto al rilascio dell'energia elastica in occasione del terremoto. I valori di spostamento descrivono una cinematica *strike-slip* destra con una leggera componente verticale, in subsidenza, nel lembo orientale della faglia. A sud di questa invece sono ben visibili le faglie di Aci Trezza, e di Belpasso-Ognina. Queste si muovono asismicamente, prevalentemente con cinematica *strike-slip* destra. La faglia di Calcerana sembra delimitare il fenomeno di *lateral spreading* del vulcano, mentre quella di Ragalna, ben visibile negli interferogrammi differenziali, è meno individuabile per la probabile cinematica nord-sud. Infatti, movimenti di questo tipo non sono rilevabili dall'interferometria satellitare. Infine, un'area in sollevamento (1 cm/year) è individuabile nell'area sud-occidentale di Catania.

Naturalmente, come visto nel caso precedente, questa tecnica permette di ottenere, per ogni pixel coerente, non solo la velocità media di deformazione, ma anche la serie temporale corrispondente. Questo può rappresentare un'informazione cruciale nell'analisi di fenomeni di deformazione come quelli che interessano ambiente fortemente dinamici come le aree vulcaniche, caratterizzate da movimenti prevalentemente non lineari. Come esempio, sono state inserite due serie temporali che forniscono degli spunti interessanti per comprendere la dinamica del terremoto avvenuto lungo la faglia di Fiandaca (Fig. 3.18.).

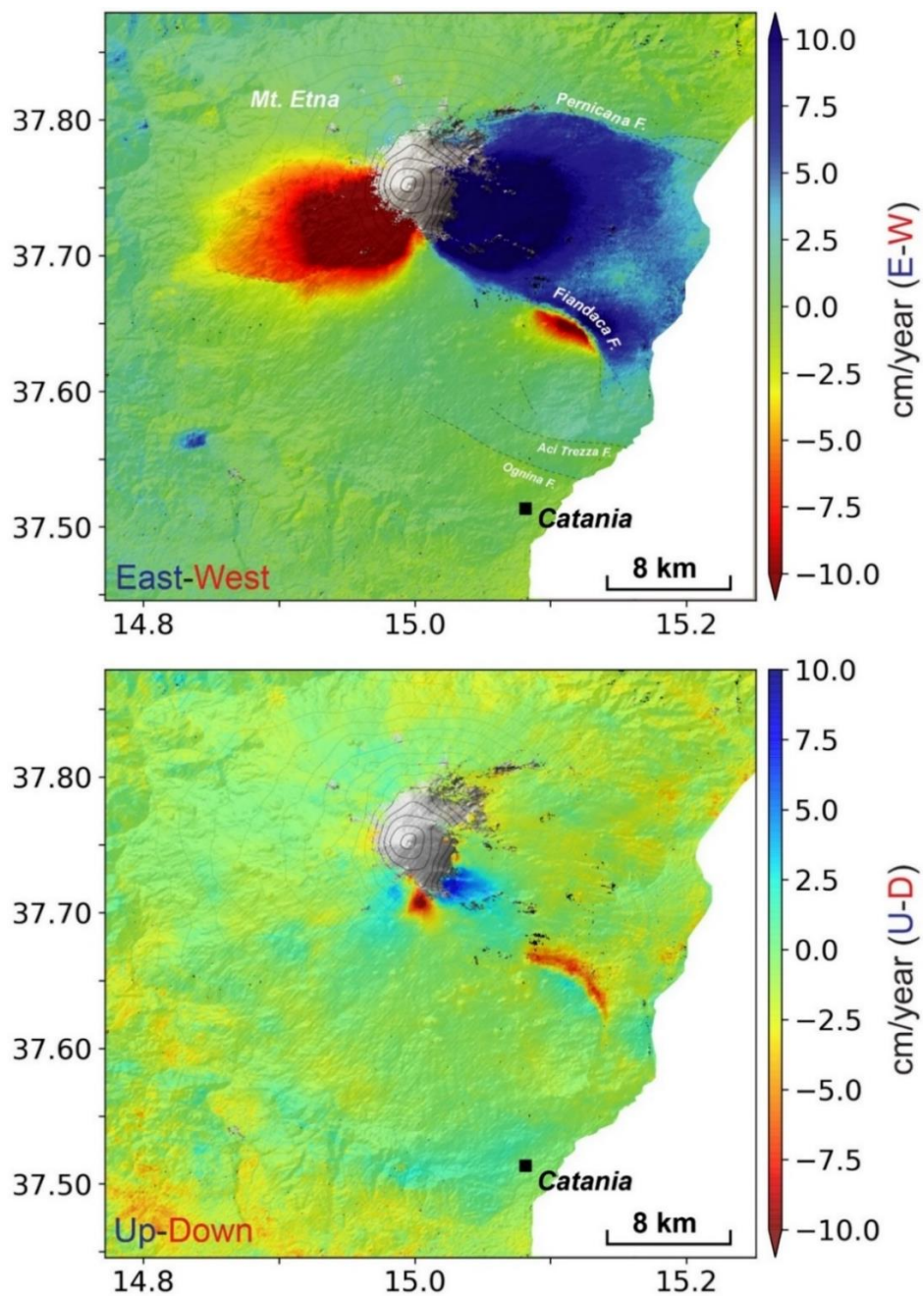


Fig. 3.17. Mappe di velocità media annuali scomposte nelle componenti est-ovest (in alto) e up-down (in basso). Queste sono ricavate utilizzando i valori LOS delle diverse geometrie di acquisizione.

Nell'immagine seguente (Fig. 3.18.) sono inserite sia una mappa di deformazione cumulativa dell'area interessata dalla Fiandaca, che le serie temporali estratte da due pixel con buona coerenza, localizzati rispettivamente al letto e al tetto della struttura. Osservando i grafici, che riportano il valore di spostamento nel tempo, è possibile individuare chiaramente la deformazione in corrispondenza del terremoto. Questa raggiunge il valore di circa 10 cm lungo la LOS. È importante sottolineare che questo dato è sottostimato a causa dei limiti intrinseci della tecnica. Tuttavia, è possibile notare che lo spostamento avviene in maniera speculare tra i due punti, confermando la cinematica strike-slip destra della faglia. Un altro aspetto che possiamo notare riguarda la fase post sismica, che si traduce in uno spostamento lungo la LOS di più di 6 centimetri. Questo è visibile come un allontanamento, rispetto alla linea di vista del sensore, in entrambi i lembi della faglia. Questa modalità di deformazione ricalca, in maniera più accelerata, il trend lineare visibile nei mesi precedenti al sisma. Proprio in questa fase le serie temporali appaiono più rumorose, segnalando forse una instabilità di fondo del sistema vulcano-tettonico. Immediatamente dopo l'evento, nella fase post-sismica, questo rumore sembra diminuire drasticamente.

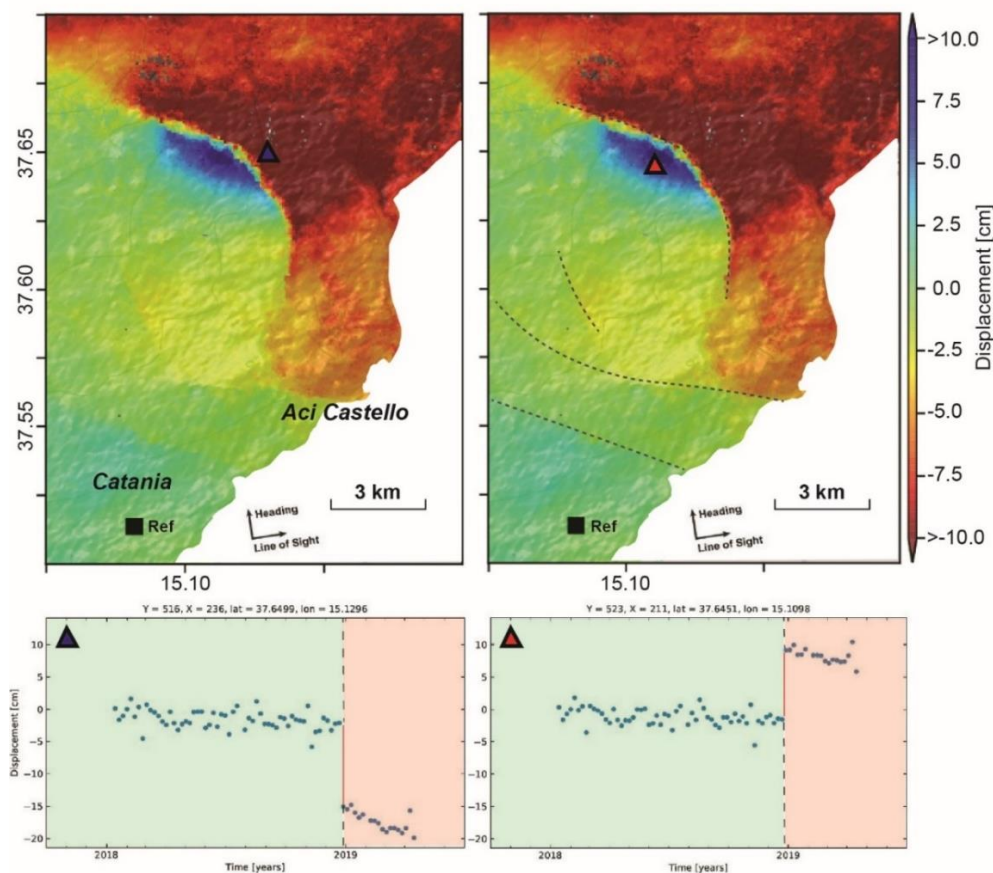


Fig. 3.18. Mappa di deformazione cumulativa dell'area di Fiandaca-Pennisi e di Catania. Sono inserite le serie temporali relative a due pixel coerenti localizzati rispettivamente al footwall e all'hanging wall della faglia principale.

3.1.5. Discussione e conclusioni

In questo lavoro si è concentrata l'attenzione sull'analisi dei prodotti InSAR per il rilevamento delle deformazioni e delle rotture cosismiche. A tal fine, sono stati presentati due diversi casi studio reali. Da un punto di vista metodologico, lo sfruttamento dei dati SAR consente di ottenere una rapida mappa preliminare delle possibili rotture del terreno. In entrambi i casi analizzati, i risultati dimostrano l'efficacia dei dati open Sentinel-1 in banda C per questo scopo. Come nel caso dei monti Sibillini, queste metodologie possono consentire di monitorare l'evoluzione delle rotture durante una sequenza sismica caratterizzata da più eventi importanti. Inoltre, possono essere utili come guida sul campo per accelerare il rilevamento dettagliato, specialmente in aree estese o remote. I risultati sono stati infatti validati con campagne di rilevamento sul terreno. In questo modo è possibile avere informazioni rapide laddove non è possibile condurre studi sul campo in maniera sicura. L'applicazione congiunta di diverse tecniche consente di estrapolare quante più informazioni possibili dai dati interferometrici. Tuttavia, ci sono molti limiti, ad esempio in presenza di vegetazione, dove non è possibile rilevare rotture del terreno. Inoltre, la limitata risoluzione dei dati radar consente di identificare solo le aree che potrebbero essere state sottoposte a deformazione, non le reali rotture. Spesso, a causa di errori di unwrapping e altri motivi di elaborazione, sono presenti falsi positivi. I risultati devono essere sempre ben interpretati da un esperto. Probabilmente è possibile ottenere risultati migliori utilizzando un DTM ad alta risoluzione per la rimozione della fase topografica e definendo buone strategie per filtrare e classificare i risultati.

Nell'ottica della progettazione di un'opera attraversante un'area tettonicamente attiva, soggetta a forti eventi sismici, studi di questo tipo possono rappresentare l'opzione più semplice ed economica per caratterizzare un'area ed individuare aree potenzialmente critiche, non solo lungo la struttura principale. Questo è possibile facendo tesoro delle informazioni ricavabili da eventi precedenti, che permettono di creare archivi contenenti le aree che hanno subito deformazione cosismica. Questo è possibile perché l'interferometria può essere effettuata con dati storici. Le analisi multi-temporali, invece, possono essere utili per valutare il movimento asismico delle faglie attive, anche post sismico. Questo è messo in luce soprattutto dallo studio effettuato sull'Etna, dove sono individuate diverse strutture con questo comportamento. In questo modo è possibile ricavare con buona precisione i valori di spostamento utili all'individuazione di soluzioni progettuali adeguate.

4. SUBSIDENZA INDOTTA

Con il termine “subsidenza” viene indicato comunemente ogni movimento di abbassamento della superficie terrestre indipendentemente dalla causa che lo ha prodotto, dal suo sviluppo areale, velocità di esplicazione, evoluzione temporale e alterazioni ambientali che ne conseguono.

I cedimenti del terreno possono essere legati a cause del tutto naturali, come processi di tettonica attiva, riequilibrio isostatico o semplici variazioni stagionali del livello di falda. Molto spesso, invece, sono invece legati ad alcuni aspetti dell’attività antropica. L’estrazione di fluidi dal sottosuolo, o lo scavo di gallerie, possono influenzare considerevolmente la subsidenza naturale di un’area o, in alcuni casi, determinarne direttamente l’innesco. La subsidenza indotta si manifesta in tempi abbastanza brevi, dall’immediato fino al massimo nell’ordine di una decina di anni. Gli effetti possono coinvolgere negativamente opere e attività antropiche nel caso non si intervenga con azioni di controllo e mitigazione. Alcune aree Italiane, individuabili soprattutto in corrispondenza della pianura padana e di molte piane costiere, sono ben note per essere interessate da importanti fenomeni di subsidenza. Tra queste è bene menzionare Venezia e Ravenna dove interagiscono negativamente processi naturali e attività antropiche. (Bock et al., 2012; Fiaschi et al., 2017). Sono tuttavia nel mondo numerosissime le aree soggette a questo tipo di fenomeno, soprattutto megalopoli e, come Città del Messico, nelle quali risiedono milioni di abitanti (Chaussard et al., 2014).

La subsidenza può essere osservata utilizzando diversi metodi. Questi possono prevedere, oltre ai classici metodi geotecnici (estensimetri, inclinometri) l’utilizzo di livellazioni di precisione, teodoliti, stazioni totali o di reti GNSS. Questi tuttavia presentano alcuni svantaggi, tra i quali le lunghe tempistiche di esecuzione ed il costo elevato. Inoltre, forniscono solamente misure discrete (point by point) con copertura areale ristretta.

Il remote sensing satellitare invece è spesso in grado di garantire una copertura areale continua e precisioni compatibili con i metodi classici, a volte anche migliori dal punto di vista dell’accuratezza verticale. L’InSAR permette di monitorare zone pericolose o inaccessibili, non richiede nessuna sofisticata strumentazione sul campo e lavora indifferentemente dalle condizioni atmosferiche. Di conseguenza il suo utilizzo comporta un inevitabile e significativa riduzione dei costi.

Lo sviluppo delle città solitamente richiede la costruzione di grandi opere sotterranee. Le infrastrutture lineari che possono attraversare gli agglomerati urbani sono spesso gallerie

stradali o ferroviarie ma anche destinate ad altri servizi come il passaggio di linee di trasporto energetico o sistemi fognari. Lo scavo di gallerie superficiali può però comportare lo sviluppo di cedimenti superficiali più o meno accentuati. L'estensione e l'entità dei cedimenti dipende da diversi fattori, quali le proprietà geo-meccaniche dei terreni/rocce attraversate, il contesto geomorfologico, le coperture, l'area della sezione di scavo, la tipologia della sezione d'avanzamento e le fasi delle lavorazioni.

Nell'ottica di un monitoraggio areale e poco invasivo, l'utilizzo dell'interferometria satellitare può essere molto vantaggioso.

In questo capitolo vengono quindi presentati due casi studio reali, concentrandosi sulle fasi di costruzione di due infrastrutture lineari sotterranee, nei quali lo sfruttamento del dato SAR è stato utile per diversi aspetti.

4.1. Trivellazione orizzontale controllata in area urbana: analisi PSI

4.1.1. Introduzione

Durante la costruzione di una infrastruttura di trasporto energetico, a volte, esiste la necessità di attraversare strade e agglomerati urbani. In questi casi l'installazione di nuove condotte attraverso il metodo classico, che ricorre a scavi a cielo aperto (trincee), non è praticabile. Le problematiche maggiori che si affrontano durante l'attraversamento di un'area urbana sono la distanza minima dagli edifici, i sottoservizi esistenti e il rumore e le vibrazioni durante i lavori. Per superare queste criticità lavorare in sottterraneo seguendo i principali assi viari rappresenta la soluzione più agevole. La Trivellazione Orizzontale Controllata (TOC), nota in inglese come HDD (*Horizontal Directional Drilling*) è una tecnologia *no dig* (o *trenchless*) idonea alla installazione di una condotta senza effettuare scavi a cielo aperto. Questa modalità di esecuzione dei lavori è diventata un metodo di costruzione sempre più popolare, cominciando a partire dai primi del 1900 per la posa dei tubi sotto le linee ferroviarie.

Questo metodo di perforazione e posa della condotta è essenzialmente costituito da tre fasi:

- Perforazione pilota (*pilot bore*): si realizza mediante una perforazione di diametro ridotto che viene manovrata attraverso la combinazione di rotazioni e spinte il cui effetto, sulla traiettoria seguita dall'utensile fondo-foro, è controllata attraverso il sistema di guida; La perforazione pilota può seguire percorsi plano-altimetrici preassegnati che possono contenere anche tratti curvilinei;

- Alesatura (*back reaming*) per l'allargamento del foro fino alle dimensioni richieste: una volta completato il foro pilota con l'uscita dal terreno dell'utensile fondo foro (exit point) viene montato, in testa alla batteria di aste di acciaio, l'utensile per l'allargamento del foro pilota (alesatore), avente un diametro maggiore a quello del foro pilota, e il tutto viene tirato a ritroso verso l'impianto di trivellazione (entry point). Durante il tragitto di rientro l'alesatore allarga il foro pilota. Questo processo può essere ripetuto più volte fino al raggiungimento del diametro richiesto. La sequenza dei passaggi di alesatura segue precisi criteri che dipendono dal tipo di terreno da attraversare e dalle sue caratteristiche geolitologiche;
- Tiro (pullback) della tubazione: completata l'ultima fase di alesatura, in corrispondenza dell'exit point la tubazione da installare viene assemblata fuori terra e collegata, con un'opportuna testa di tiro, alla batteria di aste di perforazione, con interposizione di un giunto girevole reggispinta (detto girevole o *swivel*) la cui funzione è quella di trasmettere alla tubazione in fase di varo le trazioni ma non le coppie e quindi le rotazioni. Raggiunto il punto di entrata la posa della tubazione si può considerare terminata.

Tuttavia, l'utilizzo di questo metodo di esecuzione dei lavori è comunque associato ad un raro ma comunque potenziale rischio di cedimenti del terreno che può portare a danni alle strutture preesistenti (Francis et al., 2003).

In questo caso l'analisi interferometrica può rappresentare un metodo di analisi veloce e preciso per monitorare, o escludere, le possibili deformazioni indotte sugli edifici circostanti il tracciato. In questo capitolo vengono presentati i risultati relativi all'analisi Persistent Scatterer Interferometry per il monitoraggio dell'area di Cornegliano Laudense (LO), attraversata da una TOC (Trivellazione Orizzontale Controllata), volta ad escludere ogni eventuale deformazione indotta dai lavori di costruzione.

4.1.2. Area di studio

L'opera eseguita si colloca nell'ambito territoriale della provincia di Lodi. Il comune interessato è quello di Cornegliano Laudense (LO), situato nel settore lombardo della medio-bassa pianura padana, nella porzione della piana inter-fluviale compresa tra i fiumi Adda, a est, e Lambro, ovest. La condotta è parte integrante di un progetto di stoccaggio di gas in un giacimento naturale esaurito. Questo metanodotto, lungo circa 1.8 km, collega due zone distinte dell'impianto denominate cluster e svolge, alternativamente, le funzioni di produzione e

iniezione. Per circa 700 metri, questa condotta attraversa un'area densamente urbanizzata caratterizzata da edifici residenziali e da attività commerciali.

La progettazione del tracciato ha dovuto tenere conto di questo particolare scenario, dovendo quindi mantenere una distanza minima dagli edifici, non interferire con i sottoservizi esistenti e riducendo al minimo le vibrazioni e i rumori durante l'esecuzione dei lavori. Non essendo fattibile un approccio *open cut*, è stato proposto un attraversamento dell'area in profondità con una trivellazione orizzontale controllata (TOC).

Geologicamente, infatti, l'area è caratterizzata da terreni adatti per questo tipo di perforazione, attraversando perlopiù sabbie e sabbie siltose. Nella figura seguente è inserita una sezione schematica con indicato il percorso della perforazione (Fig. 4.1.).

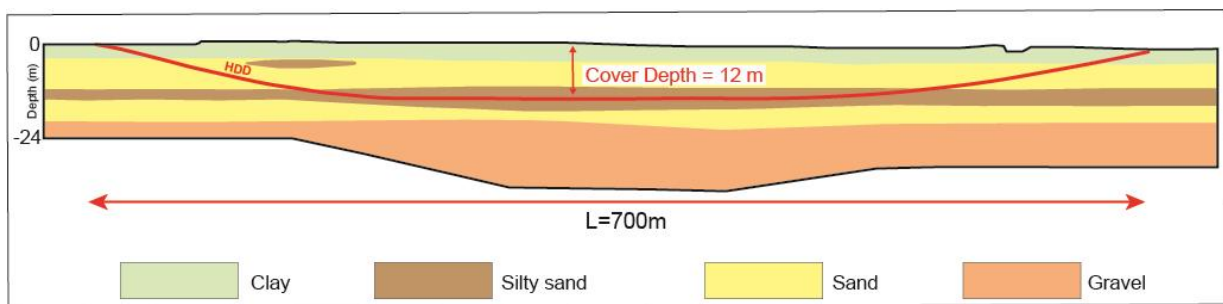


Fig. 4.1. Sezione geologica schematica dell'area. Con la linea rossa è indicata il tracciato, in profondità, della perforazione.

4.1.3. Dataset e metodi

Per escludere fenomeni preesistenti di subsidenza naturale dell'area è stata eseguita un'analisi SBAS con dati storici Envisat (2002/2010) tramite il servizio G-POD del CNR Irea. Questo ha permesso di verificare, come prima fase, la stabilità generale dell'area in studio (Fig. 4.2.).

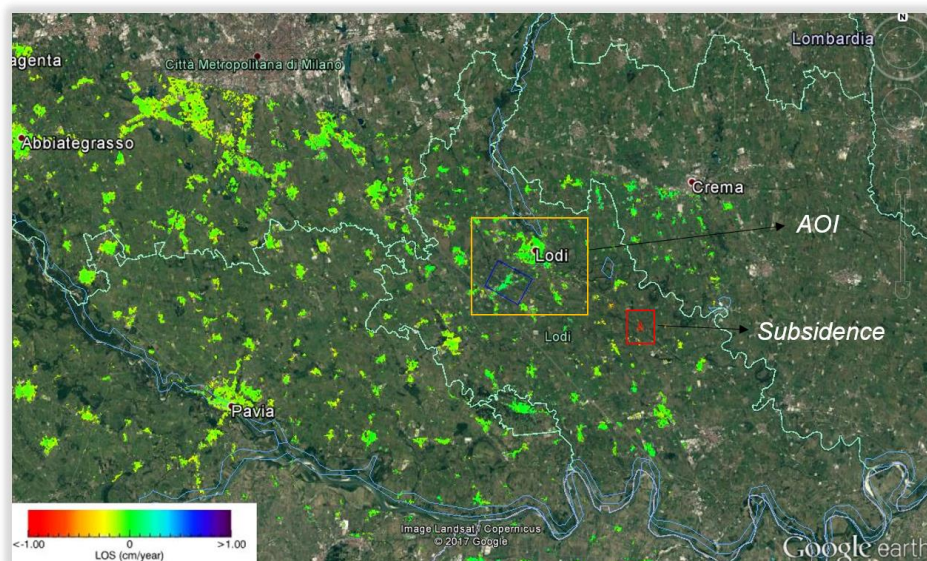


Fig. 4.2. Carta della velocità media annuale (LOS) ottenuta processando dati Envisat (2002/2010) con il servizio online GPOD del CNR Irea.

L'analisi PSI (*Persistent Scatterers Interferometry*) è stata invece condotta utilizzando 123 acquisizioni, coprendo un arco temporale abbastanza ampio che potesse comprendere sia l'intera esecuzione dei lavori che alcuni mesi prima e dopo di essi. Le immagini radar sono quelle acquisite dalla missione Sentinel-1 dell'ESA, in geometria discendente. Data la natura pianeggiante dell'area è possibile escludere a priori movimenti orizzontali del terreno, per questo motivo non è stato ritenuto necessario produrre dati interferometrici con l'orbita ascendente. Per ottenere la massima precisione e sensibilità è stato scelto l'approccio classico single master con immagini a piena risoluzione. L'intervallo tra ogni successiva acquisizione varia tra un minimo di 6 giorni ad un massimo di 12. Sono stati considerati attendibili tutti i PS con coerenza temporale maggiore di 0.7.

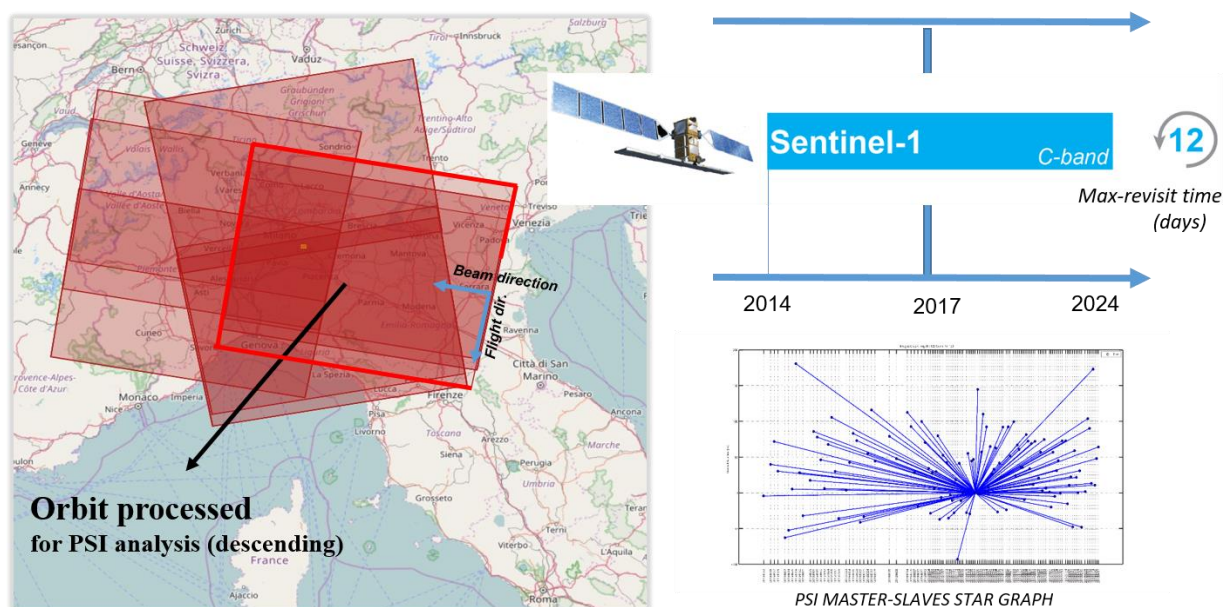


Fig. 4.3. Dataset Sentinel-1 utilizzato per l'analisi PSI.

4.1.4. Risultati e discussione

Sia i dati storici che i dati di nuova generazione permettono di affermare che l'area non era soggetta a fenomeni di subsidenza naturale progressivi. La densità di edifici permette di raggiungere buona densità di PS. I risultati ottenuti permettono di osservare la generale stabilità dell'area sia in concomitanza dei lavori di perforazione e messa in posto della condotta sia nei mesi successivi. Questo è possibile affermarlo soprattutto grazie alle serie temporali. Sono comunque presenti pochi PS che presentano velocità di deformazione media inferiori ai 5 mm

all'anno. Questi tuttavia sono ben distanti dal tracciato e non presentano variazioni di velocità correlabili nel tempo con l'esecuzione della TOC.

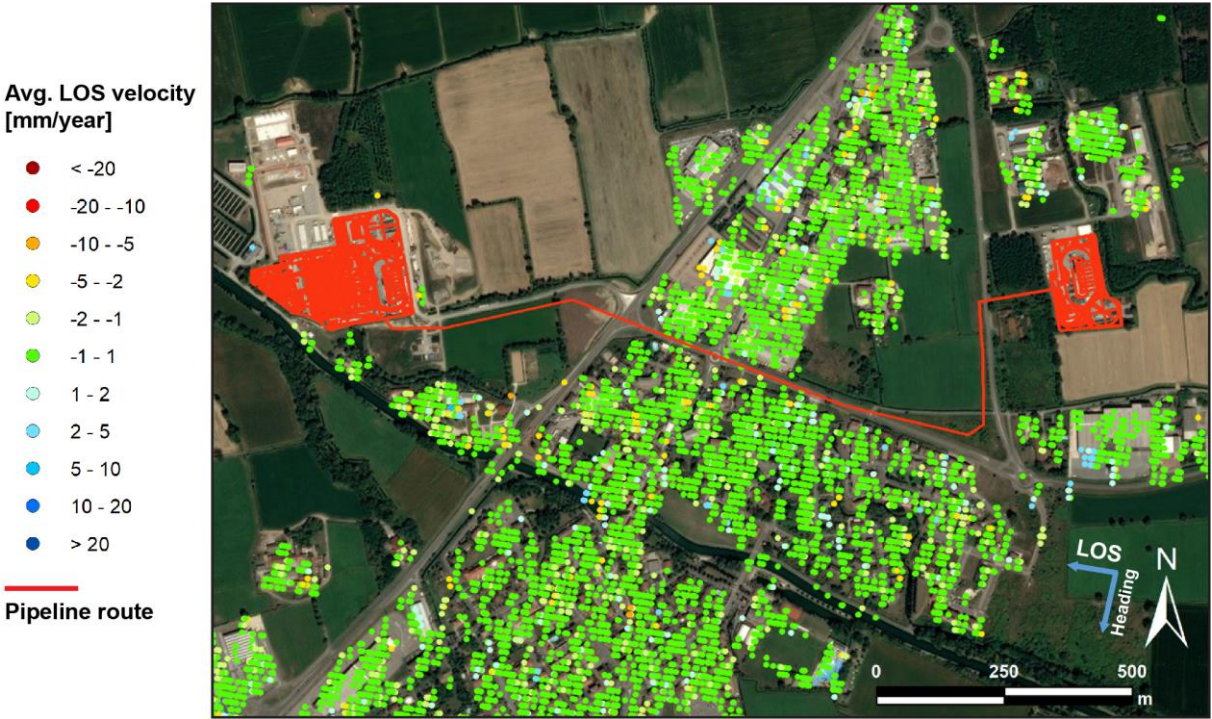


Figure 4.4. Risultati dell'analisi PSI.

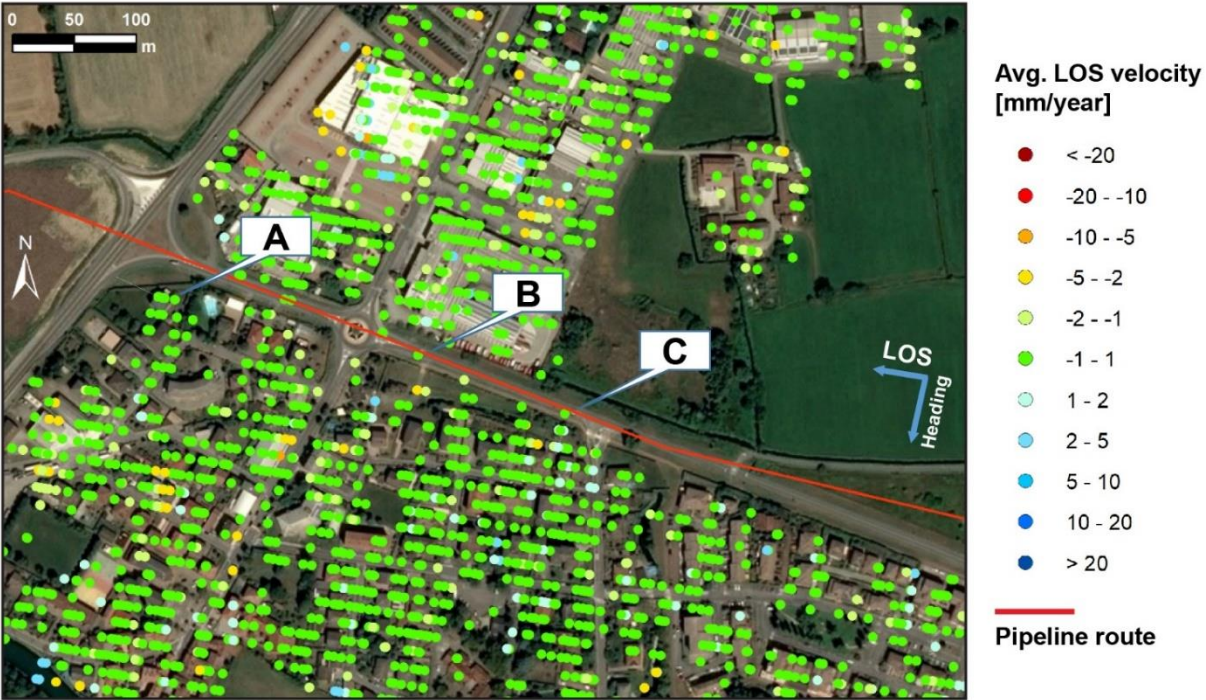


Fig. 4.5. Close up sull'attraversamento urbano del tracciato. Con le lettere sono indicate le serie temporali inserite nella figura 4.6.

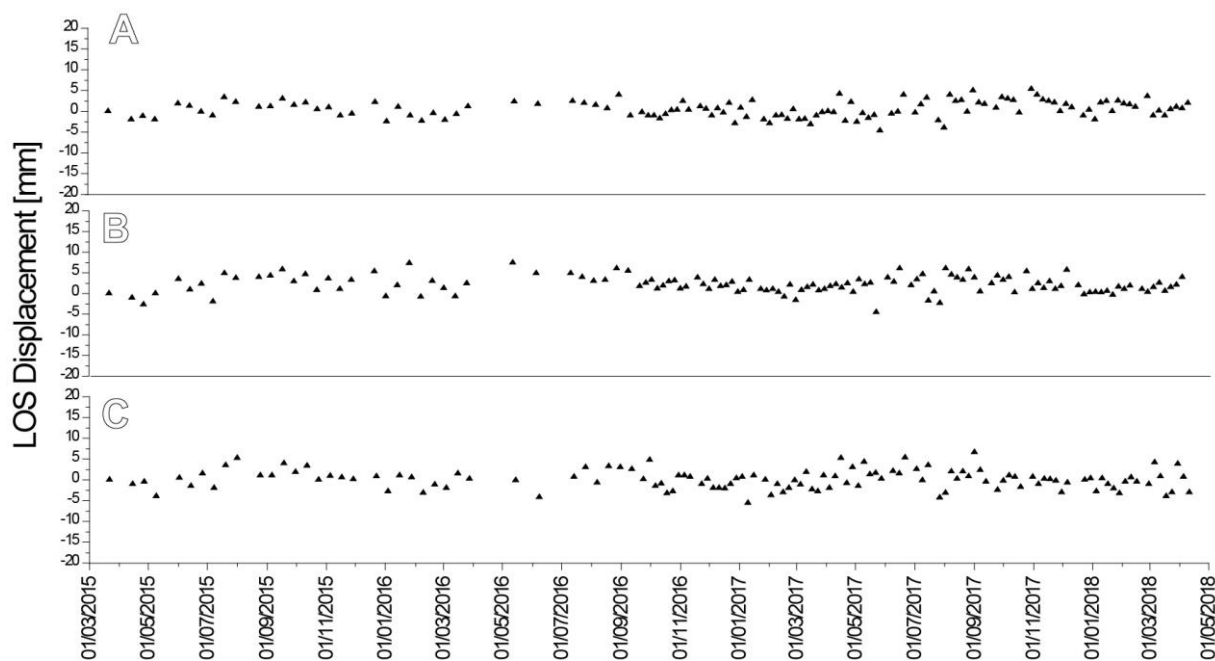


Fig. 4.6. Serie temporali relative ai PS indicati nella figura 4.5.

4.1.5 Conclusioni

L'analisi svolta è stata finalizzata all'analisi delle possibili deformazioni indotte dall'esecuzione della TOC e della messa in posto della condotta. L'approccio scelto è stato quello della tecnica classica PSI con immagini a piena risoluzione. I risultati ottenuti permettono di escludere qualsiasi tipo di interferenza dei lavori di perforazione sull'edificio presente nell'intorno del tracciato. Le serie temporali testimoniano con chiarezza la stabilità dell'area prima, durante e dopo i lavori. Date le caratteristiche costruttive e la profondità della perforazione non si attendevano possibili deformazioni. Tuttavia, l'utilizzo di un monitoraggio satellitare per giungere a queste conclusioni può essere molto importante dal punto di vista del costruttore. Infatti, può essere considerata una soluzione veloce ed economica anche per escludere eventuali responsabilità per danni a terzi.

4.2. Detection and Monitoring of Tunnelling Induced Ground Movements Using Sentinel-1 SAR interferometry

Matteo Roccheggiani^{1,*}, Daniela Piacentini¹, Emanuela Tirincanti¹, Daniele Perissin² and Marco Menichetti¹

¹Department of Pure and Applied Sciences, University of Urbino, Campus Scientifico “Enrico Mattei”, 61029 Urbino, Italy; daniela.piacentini@uniurb.it (D.P.); emanuela.tirincanti@uniurb.it (E.T.); marco.menichetti@uniurb.it (M.M.)

² RASER Limited, Hong Kong, China; daniele.perissin@sarproz.com

* Correspondence: matteo.roccheggiani@uniurb.it

Received: 31 January 2019; Accepted: 11 March 2019; Published: 15 March 2019

Remote Sensing 2019, 11(6), 639; <https://doi.org/10.3390/rs11060639>

Abstract

SAR interferometry is a powerful tool to obtain millimeter accuracy measurements of surface displacements. The Sentinel-1 satellite mission nowadays provides extensive spatial coverage, regular acquisitions and open availability. In this paper, we present an MT-InSAR analysis showing the spatial and temporal evolution of ground displacements arising from the construction of a 3.71 km overflow tunnel in Genoa, Italy. Underground tunneling can often modify the hydrological regime around an excavated area and might induce generalized surface subsidence phenomena due to pore pressure variations, especially under buildings. The tunnel was excavated beneath a densely urbanized area lying on upper Cretaceous marly limestone and Pliocene clays. Significant cumulative displacements up to 30 mm in the Line of Sight (LOS) direction were detected during the tunnel excavation. No displacements were recorded before until the middle of 2016. The Persistent Scatterers Interferometry (PSI) analysis reveals in high detail the areal subsidence, especially where the subsurface is characterized by clay and alluvial deposits as well as there is the presence of large building complexes. The time-series and the displacement rate cross-sections highlight a clear relation with the tunnel face advancement, responsible for the subsidence phenomena, which proceeded northward starting from the middle of 2016 to the end of 2017. The stabilization occurred in a range of five-six months from the beginning of each displacement phase. Due to the low subsidence ratio the ground settlements did not cause severe damages to the buildings.

4.2.1. Introduction

Genoa is a historic city and seaport of northern Italy with almost 600,000 inhabitants, capital of the Liguria region (Fig. 4.7.). The urban area has a peculiar topography characterized by a

thin coastal strip narrowly enclosed by the mountains. The coast is found only at short distance from Apennine peaks of over 1000 m. Since the Middle Ages, the city and its harbor have progressively grown, reaching their greatest extent in the 1950s. Today it has an area of 8.5 km² and it includes seven small catchments with surfaces ranging from 0.5 to 2.4 km² (Brandolini et al., 2018).

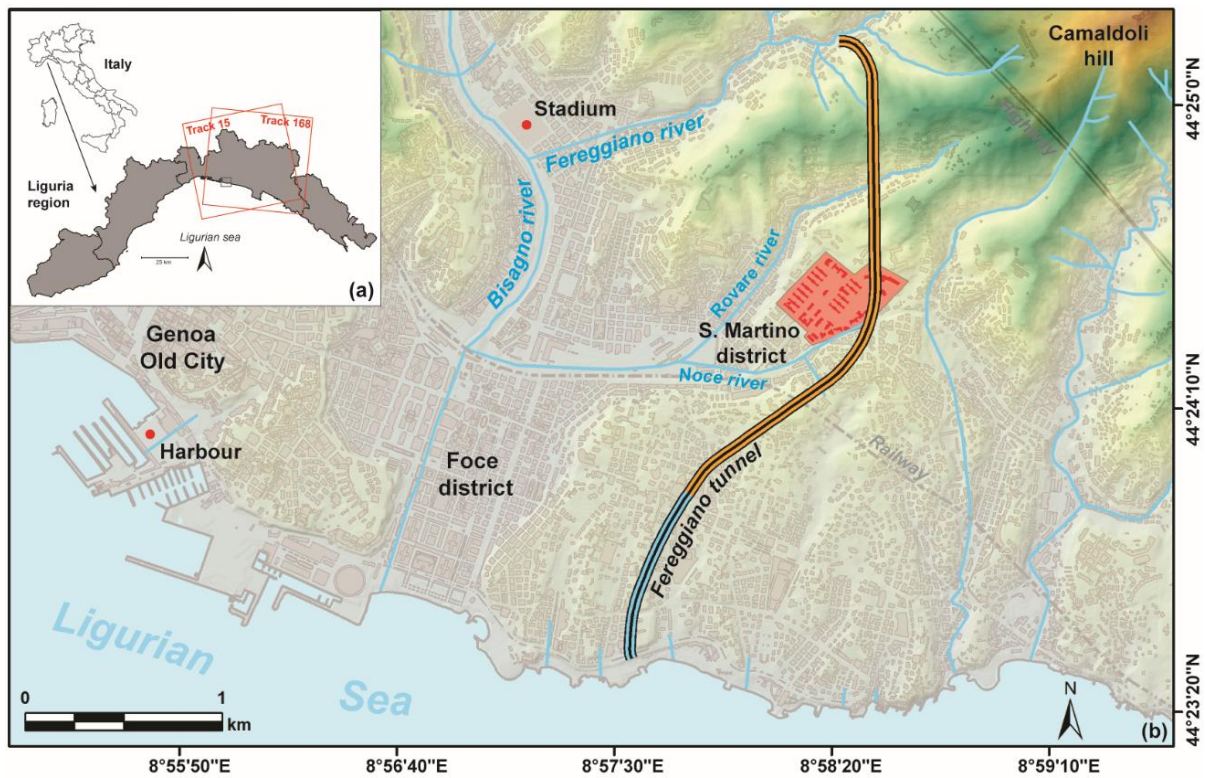


Fig. 4.7. (a) Location of the Genoa city. The Ascending (Track 15) and Descending (Track 168) Sentinel-1 frames are outlined in red. The black box indicates the location of the study area. (b) Geographical setting of the study area.

Genoa has a Mediterranean climate, with dry and hot summers, and relatively mild winters. Rainfall is mainly concentrated in spring and autumn (Acquaotta et al., 2018). The mean annual temperature is 15.8 C, and the mean annual rainfall is 1268 mm with 101 rainy days (>1 mm) (Sacchini et al., 2012).

Unfortunately, the frequency of flash floods and their severe effects on the metropolitan area, have made Genoa an emblematic case study for flooding and their related damages often caused by uncontrolled urbanization effects (Faccini et al., 2015). Recurring flood events have been attested as long ago as the Byzantine era (Faccini et al., 2018). Human interventions have almost completely reshaped and modified the original morphology. Watercourses are often covered or limited within bank walls and have lost their natural configuration. Particularly, the hydraulic setting of the Bisagno river and his tributary Fereggiano (Fig. 4.7.), appears completely

inadequate for flood events, especially in the light of the modified rainfall regime due to recent climate change. In fact, there is a secular trend of increasing rainfall intensity and average temperature in the Genoa region linked to both centennial climate oscillation and to massive land use and modifications of the main and other minor hydrographical networks (Acquaotta et al., 2018; Faccini et al., 2015; Acquaotta et al., 2018b). According to historical data, the Bisagno flooded every 16 years in the last two centuries and floods in the Genoa metropolitan area every 7–8 years (Faccini et al., 2016). This river originates at 675 m a.s.l., and has a catchment extending over an area of 95 km². It crosses the Genoa city center after 25 km, entering a covered section for the last 1.4 km before flowing into the Ligurian sea. The width of the riverbed in the final stretch was much larger in the past (Faccini et al., 2016). His left-bank tributary, the Fereggiano river, has a 3 km² catchment and his last urban stretch flows covered until entering into the Bisagno riverbed.

In November 2011, a devastating flood hard-hit especially the areas arranged along the Fereggiano river. Unfortunately, this event led to the loss of some human lives. To quickly put these areas in hydraulic safety, the municipality and the Genoa competent authorities found the solution in the construction of a drainage tunnel, extending a 909 m long track already partially built in the '90s but never completed (Fig. 4.7.).

The drainage tunnel, 3717 m long, allows flood waters of three different rivers (Fereggiano, Rovare and Noce) to flow directly into the sea, decreasing the inflow to the Bisagno river. The new construction section (2808 m) was built in 2017 using the traditional excavation method (blasting). The tunnel has a polycentric section with an internal diameter of 5.20 m and follows a north-south route under the city (Fereggiano website, 2019).

As is well known, drilling tunnels may induce surface settlements of a few centimeters because of groundwater drainage and associated pore reduction. They may seem of little importance if compared to those associated with oil, gas or groundwater extraction but they are large enough to represent a potential treat, especially below densely built-up urban areas (Crosetto et al., 2009; Catalao et al., 2011; Krivenko et al., 2012; Liu et al., 2014; Sillerico et al., 2015). Examples are reported in the literature in the cases of the construction of an investigation audit 1.5 km away from the Zeuzier arch dam (Lombardi et al., 1988) and the Gotthard highway tunnel (Zangerl et al., 2018; Zangerl et al., 2008). Subsidence was detected and measured with space-borne InSAR in the case of a headrace tunnel for a hydroelectric scheme in the Western Swiss Alps (Strozzi et al., 2011) and the Gotthard Base Tunnel (Strozzi et al., 2018) with ERS, ENVISAT and JERS satellite data. In urban areas settings are to remember the London Crossrail Case Study (Milillo et al., 2018) and the Shanghai Subway (Perissin et al., 2012), both

using X-band COSMO-SkyMed data. In the Ligurian area, application of MT-InSAR techniques using COSMO-SkyMed data are reported for the instability monitoring of infrastructures around Genoa, in particular, harbor docks and railways (Nutricato et al., 2015). For the entire Liguria Region, the Permanent Scatterers data acquired by the Liguria Regional authorities are available online for consultation (Regione Liguria, 2015). These interferometric data were obtained with SAR images of the ERS1 and ERS2 and ENVISAT missions, both on ascending and descending orbits, acquired in the period May 1992-January 2001 (ERS) and December 2002-July 2010 (ENVISAT).

In this paper we exploited the space-borne SAR data of the European Space Agency (ESA) Sentinel-1 mission to detect and investigate the displacements occurred concurrently with the construction of the Fereggiano tunnel, describing the pattern in space and in time. Nowadays, using Sentinel open data is important to demonstrate their potential usefulness, especially for areas previously studied with other satellites. With the MT-InSAR processing a really high population of reliable targets have been analyzed, capturing the different construction phases of the tunnel.

This study is organized as follows: Section 4.2.2. describes the area of interest together with the geological settings. Section 4.2.3. describes briefly the dataset and the MT-InSAR methodology adopted in this study. Section 4.2.4. presents and discusses the results. Conclusions are provided in Section 4.2.5.

4.2.2. Area of Interest and Geological Setting

The area of interest (approximately 10 km²) is located on the eastern side of the city, in the lower part of the Bisagno river catchment, more precisely in the San Martino district (Fig. 4.7.). Autonomous municipality until 1873, it became part of the great urban area of Genoa in 1926. It experienced intense urbanization, transforming itself into a densely inhabited residential area, well known for its large hospital complex, which is the main Genoa one. The newly built Fereggiano tunnel section runs mostly under this area coming from the Fereggiano valley, passing the underground railway line and going to reconnect to the pre-existing tunnel section linked to the sea (Fig. 4.7.).

The geology of the territory of Genoa has very peculiar characteristics because of the transition area between the Alpine and the Apennine mountain chains. It includes the Ligurian Alps units first involved in the Alpine evolution, subsequently affected by a tectonic phase attributable to the Apennines evolution (Capponi et al., 2008).

The terrains of the area of interest consist predominantly of flysch formations of the Cretaceous outcrop, composed by the marly limestones of Mt. Antola fm. (upper Cretaceous) and related base complex of Montoggio Shales (upper Cretaceous). The San Martino area is mainly characterized by the Ortovero Pliocenic clays (Capponi et al., 2008). These post-orogenic deposits characterize also the medieval historical center and the old harbor area (Marini et al., 1976). The stratigraphic structure is very heterogeneous, and the tectonic setting is dominated by the San Martino graben, oriented E-W and delimited by high-angle normal faults. This graben has developed within the rocky substratum of the Mt. Antola flysch, filled subsequently by the marine deposits of the Ortovero clays. The geological map and a schematic geological cross-section along the tunnel axis are shown in Figures 4.8. and 4.13.

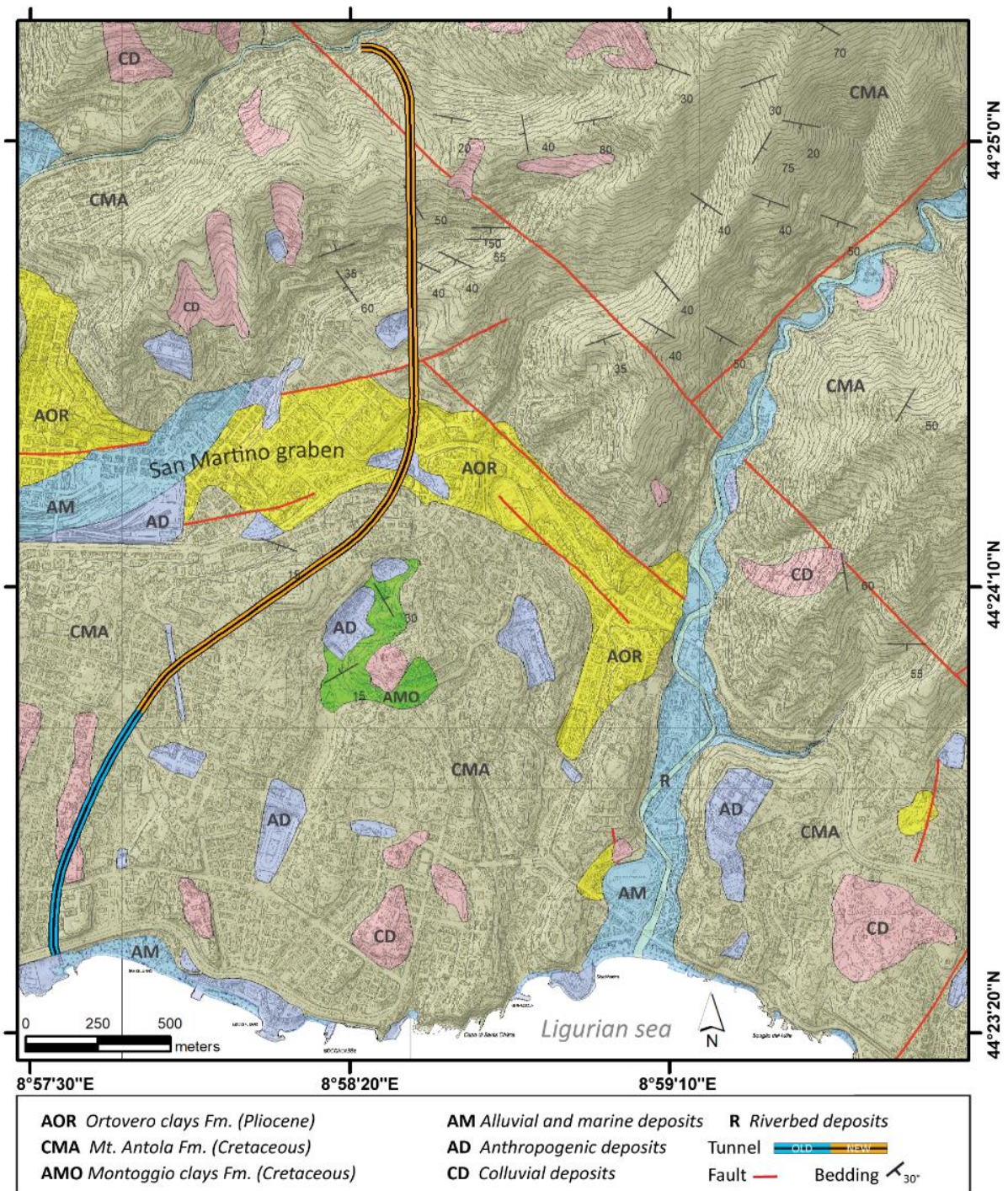


Fig. 4.8. Geological setting of the study area.

The tunnel is excavated for his entire length in the Mt. Antola fm. terrains with the exception of a few meters at the entrance to the sea. The formation consists of a turbidites sequence layers accumulated in distal facies along an inclined and unstable sea floor. In the area, the thickness of this formation does not exceed 250 m. The calcareous and marly-calcareous levels occur in layers with a thickness of 1.0–1.50 m. They are generally compact and moderately fractured in areas of major tectonic disturbance. The clay interlayers have a decimetric thickness and a high degree of alteration. The transition to the underlying Montoggio clays fm. is gradual. The lowest

and highest points of the tunnel are at 0 m at the entrance, and 13 m for the last sector (Fereggiano river catchment). The topography near the tunnel axis reaches the highest altitude of 181 m resulting for a max project depth of 170 m. The tunnel runs a few meters below the base of the Ortovero Pliocenic clays about halfway along its route, at an average depth of 60 m. The Ortovero clays fm. is a marine deposit made up of prevailing marls, over-consolidated marly clays, siltstones and fine sandstones. The prevailing color (not altered) is grey or light blue. Rarely there is the presence of gravel levels and sand lens. At the base of the formation and at the contact with the Antola fm. there is the presence of gravel and conglomerate levels whose thickness varies from a few centimeters to a few meters. Outcroppings of this formation are rare because it is confined to densely urbanized areas, and/or covered with debris, alluvial or carryover material. Laterally, the passage between the Ortovero clays and the Antola Fm. is marked by fault breccia and slumping deposits. The tunnel intersects two normal faults.

The area investigated is in a context of total anthropization characterized by both erosional and accumulation man-made landforms. The main geomorphic features concern artificial modifications of drainage networks and reshaped slopes. Some alluvial and marine deposits can be found in the main riverbeds and along the coastline (Fig. 4.8.). In the area, flash floods are recurrent and sometimes disastrous (Faccini et al., 2015, 2018) and currently there is no evidence of ongoing or potential landslides (Capponi et al., 2008).

4.2.3. Dataset and Methodology

A space-borne synthetic aperture radar multi temporal interferometry (MT-InSAR) analysis has been performed. This is a well-established technique for ground displacement monitoring characterized by millimeter accuracy. Interferometric Synthetic aperture radar (InSAR) is based on the phase comparison of different SAR images acquired at different times with slightly different angles. The phase difference contains the phase term proportional to the target motion occurred during the interval between the acquisitions along the sensor-target line of sight (LOS) direction. Multi-image techniques permit to identify radar targets exhibiting coherent phase behavior (persistent scatterers, PS) and remove atmospheric artefacts, getting higher accuracy and reliable time-series. A detailed description of the method can be found in (Colesanti et al., 2003; Ferretti et al., 2000, 2001, 2011; Kampes, 2006) and a comprehensive review in (Crosetto et al., 2016). We executed the wide-area analysis over the entire Genoa city and surrounding area, utilizing the available dataset composed of 320 Sentinel-1 C-band (5.6 cm wavelength) single look complex scenes per both of its ascending (159 images, orbit 15) and descending (161 images, orbit 168) geometries (frames in Figure 4.7.). The European Space agency (ESA)

Sentinel-1 operates in TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans) mode which captures images consisting of series of bursts with mutual overlaps. The spatial resolution provided is 5 m x 20 m. The two satellites (Sentinel-1 A&B) are in polar orbit, therefore they pass over the area of interest south to north in ascending pass and north to south in descending pass. The covered time period starts from April 2015 to October 2018, with approximately one acquisition every six or max twelve days. The orbit state vectors of each scene were refined using Sentinel-1 precise orbit ephemerides (POE) to reduce errors due to the satellite orbit inaccuracies. POE are published online by ESA (Precise Orbit Ephemerides, 2019).

In this work we used the procedures implemented in SARPROZ software (Perissin et al., 2011) adopting a classic persistent scatterers interferometry (PSI). This method applies a single master configuration analysis based on algorithms proposed in literature (Ferretti et al., 2000, 2001, 2001, Kampes et al., 2006). The multi-temporal processing (estimation of parameters) comes from the maximization of the periodogram and does not require either spatial unwrapping or filtering to the wrapped interferograms.

In the analysis, differential SAR interferometry is applied only on selected pixels, generally man-made objects, characterized by point-target scattering behaviour and are persistent over a long observation time. They can be used for monitoring both the displacement of individual structures and the evolution of a large displacement field. The density of ground targets can reach very high densities in urban areas. In this study PS candidates (PSC) were selected based on a combination of quality parameters related to the radar signal stability of the targets. Therefore, parameters such as reflectivity, amplitude stability index (ASI) and the spatial coherence have been considered. The first applied processing steps were the master images selection followed by the images co-registration adopting a classical star images graph. One master image is selected and all the other images are connected with the one common master image (Fig. 4.9.). The reference master images were chosen among those acquired approximately in the mid of the temporal and perpendicular baseline domain to minimize space and temporal decorrelations (Zebker et al., 1992). The corresponding interferograms were computed.

The removal of the topographic phase was carried out using the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) digital elevation model (DEM) with a pixel resolution of 3 arc second (90 m x 90 m), made available by NASA (National Aeronautics and Space Administration) in partnership with the USGS (United States Geological Survey) (NASA, accessed 2018).

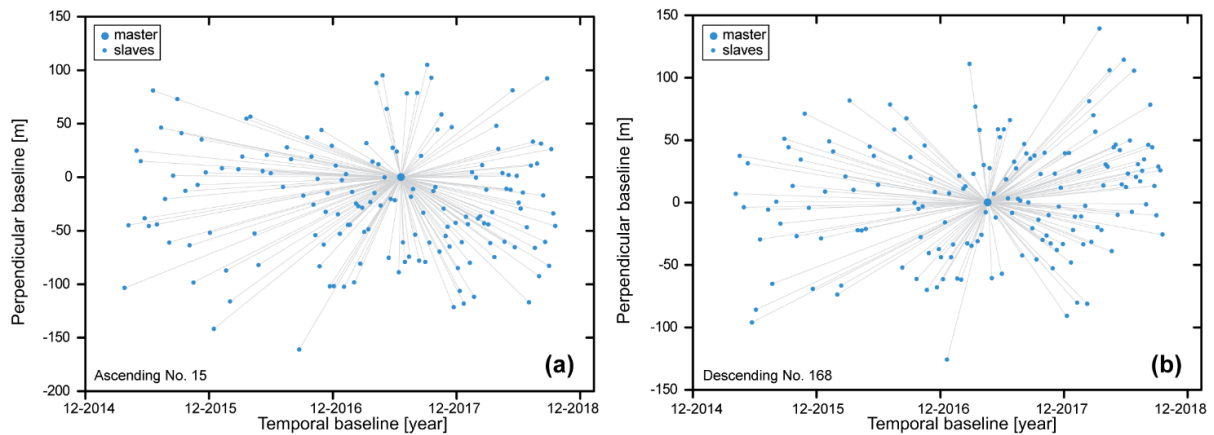


Fig. 4.9. Sentinel-1 images graphs (single master PS analysis) for the Ascending frame no. 15 (a) and the Descending frame no. 168 (b). Each point represents an image and each line represents an interferogram. x-axis: temporal baseline of the acquisitions. y-axis: normal baseline of the acquisitions.

A strong preliminary network consisting of a sub-selection of PSC ($ASI > 0.8$) was created to estimate the height and velocity parameters to detect and remove the atmospheric phase screen (APS). After the APS removal phase, a subsequent estimation of the parameters was performed on the entire data set of the initial selection of the PSC. At the end of the analysis all the persistent scatterers with temporal coherence above 0.7 were selected. For each target the LOS velocity, displacement time series and heights have been estimated adopting a linear trend model. To obtain reliable results the reference point with zero displacement were located in a well constrained stable area outside the tunnel trajectory and away from known landslides.

4.2.4. Results and Discussion

In Figure 4.10., a general overview of the average line-of-sight annual velocities estimated from Sentinel data is presented. The figures show the results with both datasets of ascending and descending orbits over the whole area of Genoa city. In the two maps the color scale is [20/20] mm/year. Due to the many buildings the maps show a nearly continuous distributions of PSs, except in the NW corner sector, where there is sparse urbanization and vegetation. Reference points are the same for both datasets to avoid biases in the analysis and situated in a flat stable area.

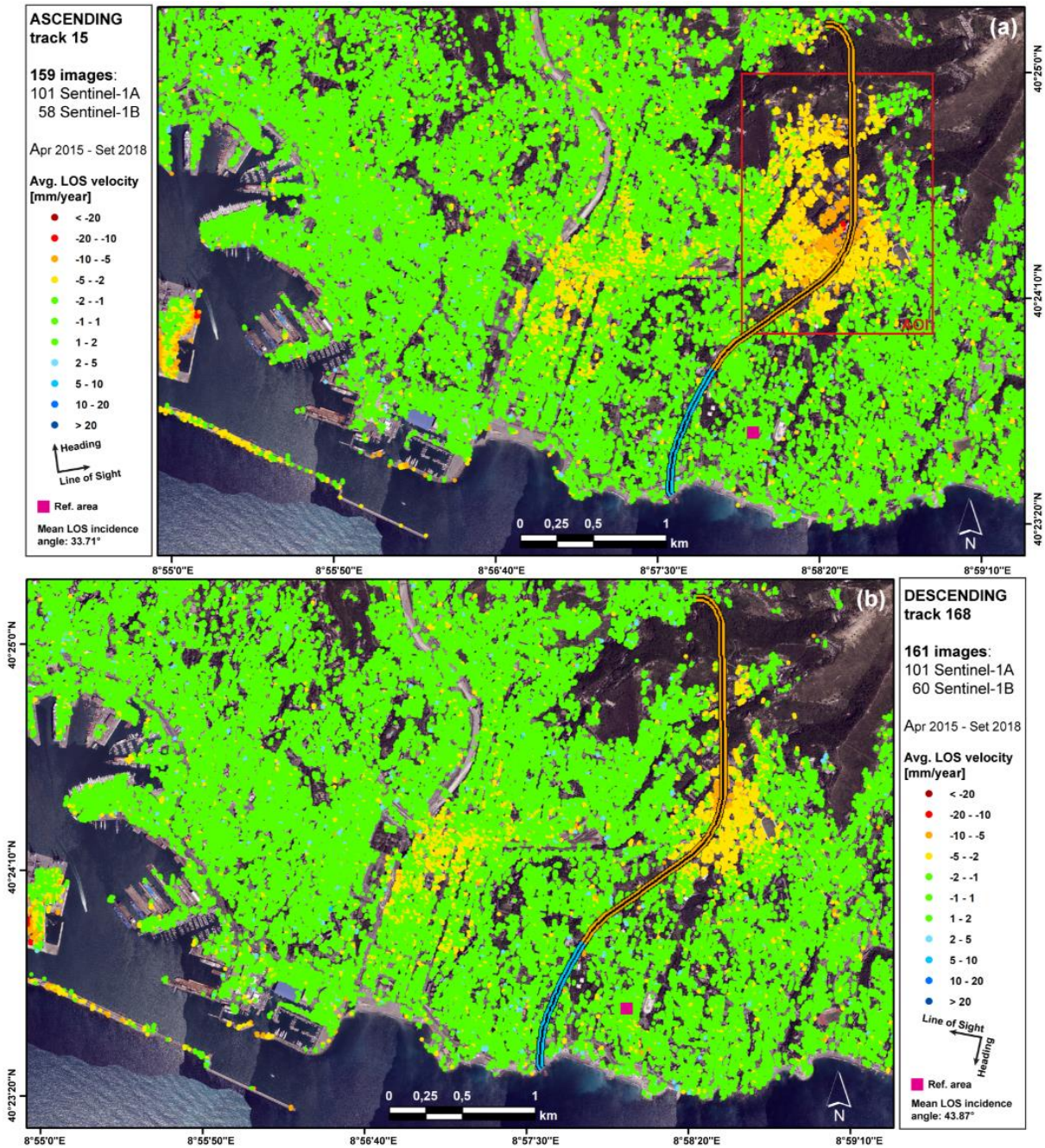


Fig. 4.10. Average 2015–2018 velocity maps of displacement in the Genoa area. In (a) and (b) LOS velocities in mm/years are reported. Green points indicate stable areas. Ground subsidence is clearly visible in the area of interest (red box).

We can notice three different areas of subsidence, appearing with yellow, orange and red colors, respectively in the harbor zone, at Foce district and S. Martino district. From east to west, we can clearly appreciate first the potentially expected sinking phenomena of the harbor structures, like docks and piers. At the same time, in the center of each maps, the PSI analysis highlights different macro-areas of subsidence (2 to 5 mm/year) linked most-likely to the paleo-riverbeds of the Bisagno river and his tributary Noce river, filled by alluvial deposits. This is particularly visible along the left bank of the river Bisagno, as a narrow linear yellow strip, which from the

stadium runs southward and interconnects itself with another one, near the railway, oriented E-W (Figure 4.7.). This strip then widens for a few hundred meters under the “Foce” (in English: river-mouth) Genoa district. The kinematic behavior of these two sectors appears to be consistent with that described by previous analyses of interferometric data (Nutricato et al., 2015, Regione Liguria, 2019) carried out exploiting images of ERS1/ERS2 (acquired in the period 1992–2001), ENVISAT (acquired in the period 2002–2010) and COSMO-SkyMed (acquired in the period 2007–2008).

By looking at the western sector of the maps we can notice an additional widespread subsidence area. Here the displacement rate goes from 2 to 25 mm/y. To retrieve the origin of this ground settlements, we recovered from the Genoa city authorities (Fereggiano website, 2019) the location of the newly built Fereggiano overflow tunnel, which is a strategic and of high importance infrastructure for the city’s hydraulic safety. This area presents itself as a 10 km² subsiding zone elongated N-S and correspondent mainly with the San Martino district. In Figure 4.11. this area is shown as a close-up. The light blue line represents the pre-existing tunnel section, while the orange line indicates the new-built 2808 m. As we can notice, the ascending line-of-sight subsidence appears greater in magnitude and areal than for the descending orbit. This is attributed to the different satellite viewing geometries that were exploited in the analysis. Both results indicate a subsiding surface.

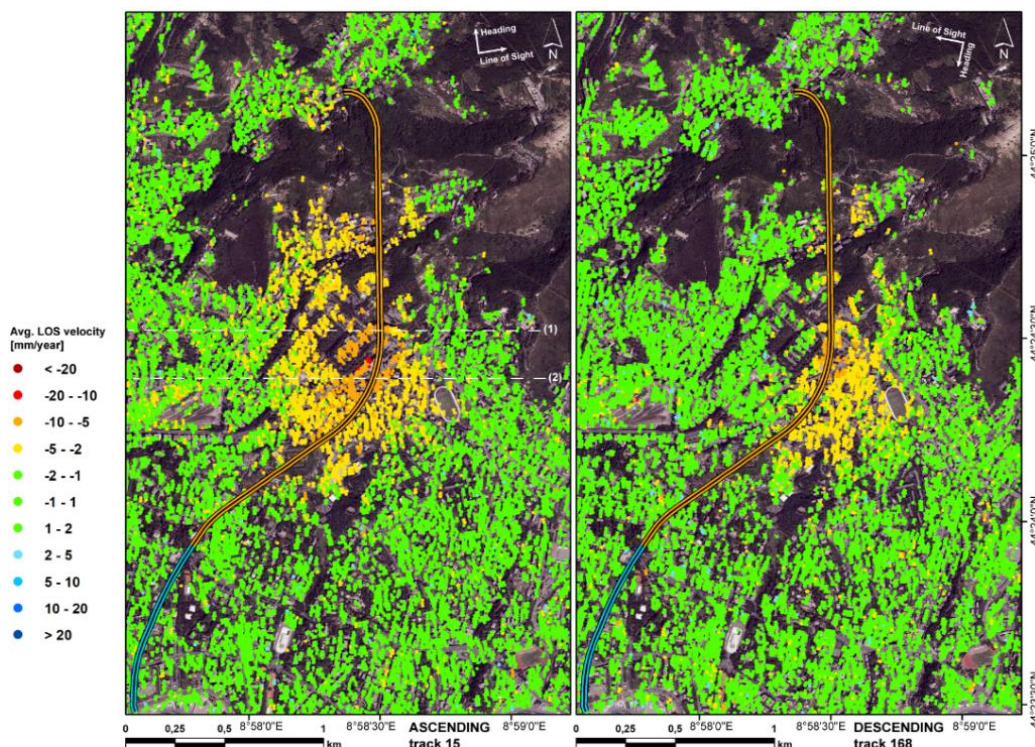


Fig. 4.11. Close-up of the average displacement rates (LOS direction, mm/y) above the Fereggiano tunnel from Sentinel-1 SAR data 2015-2018. Negative values (from yellow to red) indicates a lowering of the surface. Cross-sections (1) and (2) are represented in the Figure 4.12.

The density of PSs permitted to estimate the subsidence profile in two representative segments, perpendicular to the tunnel. The average deformation trend cross-sections are reported in Figure 4.12. The vertical axis displays the settlement velocity in mm/y. The horizontal axis is expressed in meters and indicates the relative distance from the tunnel along the transects. It is shown that the locus of the maximum LOS velocity was found to be on the tunnel's axis. In these areas, the tunnel runs about 50 m below the surface. In this case the buffer zone around the tunnel is quite large, as the deformation begins to increase 500 m away from the track. Compared to other studies this value is quite high and is due to site geological factors and the soil-structures interaction. In these cross-sections we can notice how the western side is affected by the slight subsidence (1 to 3 mm/y) given by the soft deposits of the Noce river (Fig. 4.7.). The accurate analysis of settlement traverse profiles could allow tracing the tunnel track with high accuracy even in case of unavailability or public inaccessibility of the project. In our study, the profile shape is quite in accordance with the prediction theoretical displacements models of the settlements transverse profile induced by tunneling (Martos et al., 1958; Mahmutoglu et al., 2011; O'Reilly et al., 1982). As known, the usual procedures for the assessment of structural damage induced by ground-settlement start with the evaluation of the tensile strains caused by the greenfield settlement profile (Burland et al., 2004). The soil greenfield displacements are defined as underground-excavation ground displacements in absence of buildings. They are usually calculated neglecting the influence of the structure weight, considering instead soil characteristics, tunnel depth and diameter, and the volume of ground lost (Mair et al., 1993; Peck et al., 1969). The building weight and stiffness typically has the effect of widening the soil settlement profile, reducing the curvature (Milillo et al., 2018). In this case, the max LOS cumulative displacement reaches 30 mm, in correspondence of the large complex of buildings in San Martino district (Fig. 4.7.).

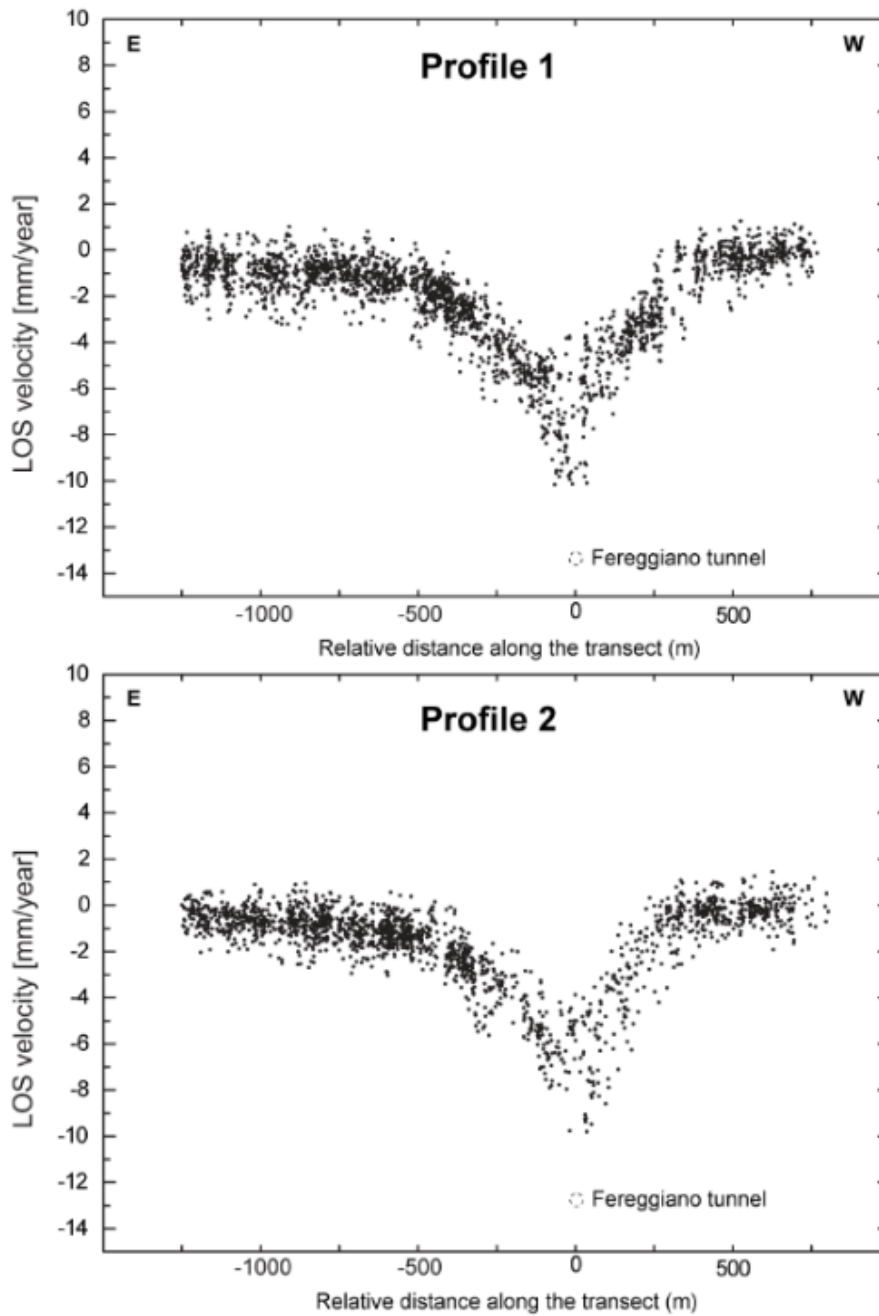


Fig. 4.12. Subsidence trend profiles of the settlements area. The vertical axis displays the settlement velocity in mm/y. The horizontal axis is expressed in meters and indicate the relative distance from the tunnel along the transects.

In Figure 4.13. is reported a geological cross-section drawn along the longitudinal profile of the tunnel (blue-dotted line). For comparison purposes, in the upper part of the figure we inserted the corresponding value of LOS cumulative displacement along the section, achieved through an interpolation of the PSs values. It can be seen that, the subsidence values along the pre-existing tunnel section are negligible. Values greater than -5 mm start at about the area where the new-built section lies. The ground-displacements values increase proceeding northbound,

reaching the maximum values in the San Martino graben (Fig. 4.8.), the values then decrease northward, except in correspondence with the valley of the Rovare river.

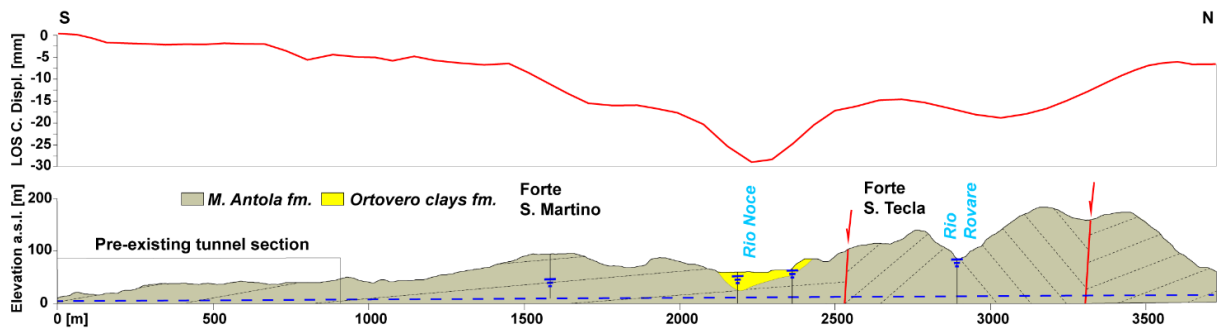


Fig. 4.13. Geological section along the Fereggiano overflow tunnel (drawn as a blue dotted line). The red line represents the longitudinal profile along the tunnel axis of the LOS cumulative displacement (ascending orbit). The water table level (blue triangle) and the location of boreholes (black vertical line) are also show. Elevation exaggeration: 1.5.

The two areas of subsidence maxima are easily noticeable in Figure 4.14., where a contouring map of the ascending cumulative displacement is shown. At the right side of the figure time-series of specific reliable point targets with high coherence, are presented. In each graph, the x-axis contains the acquisition time (years), while the y-axis indicates the LOS displacement in mm. The timespan of the main displacement occurred, is denoted with grey in the graphs of Figure 4.14. Targets were chosen all along the tunnel trajectory. Results indicate a straight relation of the time series with the tunnel's face advancement. The southern target (no. 46985) started to be affected by ground-settlement in the middle of 2016, and the northern one (no. 88883) at the end of 2017. Each displacement phase lasts on average five-six months before the stabilization. The northbound progressive displacement is well constrained by the PSs time series as shown in graphs of the Figure 4.14.

The overall stability of the area before the tunneling works is particularly noticeable and also confirmed from the kinematic behavior described by previous analyses of interferometric data (Nutricato et al., 2015; Regione Liguria, 2019). The new-built tunnel runs mainly through the marly limestones of Mt. Antola and the Ortovero clays formations both characterized by low rates of natural subsidence. Accordingly, the results highlight that the main reason of subsidence in the area is due to the tunnel construction and that the greater displacement values are definitely reached where there is the presence of multiple predisposing factors. In fact, as we expected, the area characterized by the coexistence of a metric coverage of alluvional deposits, a shallow water table and, not last, the large complex of buildings, is the one that suffered the most from the tunnel's influence.

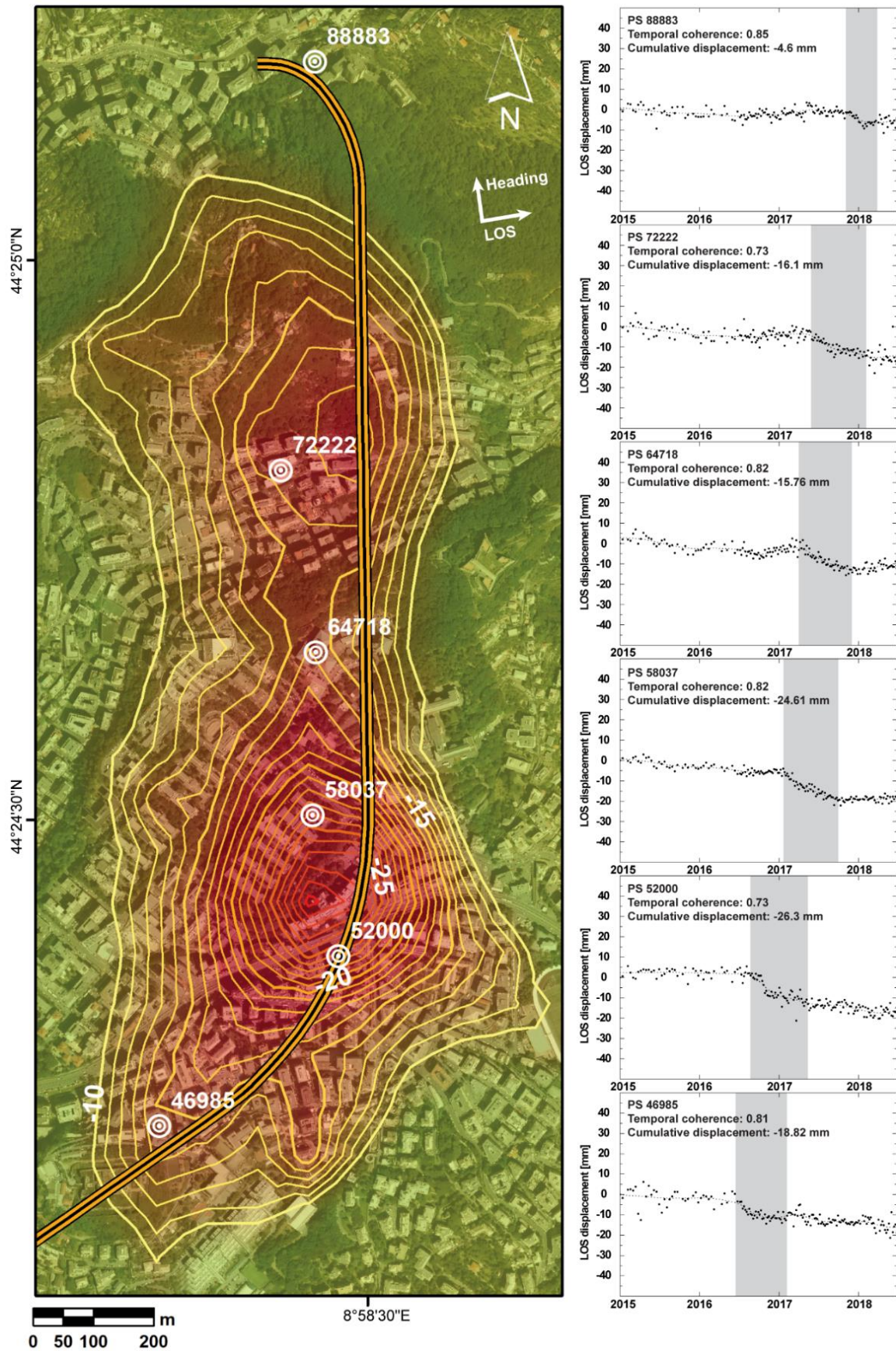


Fig. 4.14. Contour map of cumulative displacement (LOS ascending direction, mm). The targets indicate the location of the PSs selected to show in the related time series (on the right). The T.S. graphs show the progressive deformation along the tunnel axis.

4.2.5. Conclusions

The study highlights the reliability and the usefulness of the C-band Sentinel-1 mission data and the PS technique applied in an urban area like Genoa. In this paper 320 SAR images acquired by ESA have been processed with SARPROZ software covering a time span from 2015 to the end of 2018. We adopted a classic PSI single master configuration analysis approach. Subsidence areas of Genoa are revealed in good detail, making it possible to detect the subsiding piers of the harbor or the built-up paleo-riverbed areas. The PSI analysis made especially possible to track the ground settlements arising from the newly excavated Fereggiano overflow tunnel. This is a strategic infrastructure for the city of Genoa, 3717 m long, which allows flood waters of three different rivers (Fereggiano, Rovare and Noce) to flow directly into the sea. The new construction section (2808 m long) was built using the traditional blasting excavation method. The tunnel runs beneath a dense urbanized area through the marly limestones of Mt. Antola fm. (upper Cretaceous) and passing beneath the Ortovero clays formation (Pliocene). Small but significant cumulative displacements up to 30 mm in the LOS direction were detected in the area. No significant displacements were recorded before until end of 2016.

The outcomes confirm the high density of target detectable using Sentinel images with respect to other interferometric data analyses and demonstrate the potential usefulness of this sensor in addition to other satellites previously exploited. The numerous targets permit to enhance the understanding of the ground-settlements patterns in space and their spatio-temporal progression. Transverse subsidence profiles were made perpendicularly over the tunnel trajectory, showing a clear relation with the excavation works in a buffer zone of max 500 m circa for each side. As well known, underground drilling can often modify the hydrological regime around an excavated area and might induce generalized surface subsidence phenomena due to pore pressure reduction.

The results reveal the reliability of Sentinel data in monitoring of ongoing infrastructures. This is particularly relevant, from a cost-benefit point of view, to perform periodic controls during the construction phase of important works, mainly in vulnerable areas. The Sentinel-1 SAR data, with a revisiting time of six days, opened the possibility to monitor the displacements induced by progressing excavation front. The time-series analysis of the reliable targets with high coherence shows quite clearly the tunnel face advancement, which triggered the subsidence phenomena proceeding south to north starting from the middle of 2016 until the end of 2017 with different magnitude due to the tunnel depth, the geological characteristic of the crossed terrains and the soil-structure interaction. During the excavation works the deformation

phases took place progressively along the track, lasting about six months before stabilization (terrain consolidation). Due to the low subsidence ratio the small-scale ground settlements did not cause severe damages to the buildings.

This study demonstrates once again the usefulness and the great importance of Sentinel missions which supply worldwide covering free and open-access data. Achieving the same spatio-temporal resolution and accuracy with conventional surveying methods can involve much higher costs, especially in areas that need extended coverage. Furthermore, the results validate the possibility of applying this analysis for the monitoring of infrastructures in remote areas.

The obtained results could also be significant for the development and calibration of numerical models to be employed to simulate the expected ground settlements in urban environments during each phase of the tunneling works, from the design to the monitoring after the construction. Outcomes of this analysis might be useful especially in this area, which shortly will be crossed by a new railway subway infrastructure and the Bisagno river overflow tunnel.

5. MOVIMENTI FRANOSI

Le frane rappresentano un pericolo importante per tutte le infrastrutture lineari, come le strade, che nella loro estensione chilometrica attraversano inevitabilmente paesaggi collinari e montani. Questo discorso vale anche, soprattutto, per quelle sotterranee, come le pipeline. Una frana crea delle deformazioni permanenti del suolo. Per accomodarle, una condotta deve deformarsi sia assialmente che in flessione (Nyman et al., 2008). La rottura di una condotta interrata a causa di un movimento franoso non è un avvenimento raro. Questo tipo di incidenti spesso comportano perdite che possono portare ad esplosioni, forte impatto ambientale e lunghi periodi di stop delle forniture (Savigny et al., 2005). Le statistiche indicano che le frane sono la causa più comune di rottura di condotte interrate, per questo motivo ne rappresentano il maggior rischio operativo (Sweeney et al., 2005).

Evitare l'attraversamento di aree critiche da questo punto di vista rappresenta la migliore opzione di riduzione del rischio, sia in termini economici che di tempo. Questo perché l'investigazione e la conseguente mitigazione di ogni area a rischio frana è dispendioso in termini di tempo e non è una pratica economicamente sostenibile (Sweeney et al., 2005).

La valutazione del rischio da frana lungo un tracciato è finalizzata all'identificazione delle aree instabili che rendono necessario adottare determinate soluzioni progettuali fino ad un possibile un re-routing. Nei casi in cui le aree critiche non possono essere evitate, è necessaria una valutazione dettagliata di tutte le condizioni del sito per supportare la progettazione e la costruzione di misure di mitigazione. In entrambi i casi l'interferometria satellitare può rappresentare una delle soluzioni più rapide ed economiche per acquisire dati.

Il pericolo associato alle frane è determinato dal tipo di movimento che può verificarsi e il relativo potenziale di produrre conseguenze avverse (Marinos et al., 2016). L'interferometria permette di individuare e di seguire l'evoluzione di fenomeni gravitativi lenti, quindi frane già esistenti o l'espansione di queste. Invece non è utile in caso di frane di nuova generazione, caratterizzate spesso da movimenti rapidi, non sempre prevedibili.

Non tutte le frane che possono interessare una condotta ne causano necessariamente la rottura. A volte i danni possono essere limitati a piegamenti o a fenomeni di buckling. Un buon numero di esempi di rottura è stato sviluppato per le condotte interrate, basandosi sull'esperienza delle industrie del settore (Nyman et al., 2008; Lee et al., 2009; Young & Lockey, 2013). Tra questi l'interferometria può essere utile ad individuare quelle aree che possono portare a spostamenti laterali o verticale. Una condotta infatti può rompersi in seguito agli spostamenti differenziali

di un corpo di frana. L'entità della deformazione di una condotta è una funzione della profondità della frana, del comportamento dei materiali, della velocità di movimento e dello spostamento cumulativo nel tempo. Nel lavoro seguente l'InSAR viene applicato all'individuazione del rischio frana lungo degli ipotetici tracciati.

5.1. L'utilizzo dell'interferometria satellitare per lo screening preliminare della franosità in aree vaste.

5.1.1. Introduzione

L'utilizzo dei dati interferometrici per l'analisi ed il monitoraggio dei fenomeni franosi presenta indiscutibilmente numerosi vantaggi, ma anche molte limitazioni. Alcune di queste possono essere quanto meno ridotte adottando tecniche particolari di processamento dei dati, altre invece rimangono insuperabili e sono legate ai limiti intrinseci dell'InSAR. In particolare, le limitazioni preponderanti dell'applicabilità della tecnica ai movimenti franosi, ed in generale allo studio delle aree montuose e collinari, vengono dalle distorsioni geometriche, dalla decorrelazione temporale, dalla bassa coerenza. I fenomeni franosi che possono essere indagati e monitorati tramite l'utilizzo di dati SAR rimangono quelli classificabili come lenti, ossia con velocità inferiori a 1.6 m/anno secondo la classificazione di Cruden & Varnes, 1994. Per questo motivo i dissesti rapidi o in repentina accelerazione non risultano monitorabili, come ad esempio i crolli e i ribaltamenti. Ne rimangono però, in alcuni casi, individuabili tutti gli eventuali movimenti precursori. Tuttavia, sono proprio i movimenti lenti ad essere meno facilmente identificabili e quindi più propensi a deformare una struttura nell'arco della sua vita utile.

La decorrelazione temporale è invece direttamente proporzionale all'intervallo di tempo intercorso tra due successive acquisizioni, ed è uno dei fattori maggiormente limitanti, soprattutto se l'obiettivo è indagare aree molto vegetate o aree rurali, non densamente edificate. Questo è un aspetto cruciale da valutare nell'utilizzo dell'interferometria per lo screening delle aree in frana nell'ambito della progettazione di un'infrastruttura lineare, poiché oggi le aree più stabili dove collocare le strutture sono meno disponibili a causa della crescente urbanizzazione e della necessità di salvaguardare gli ambiti di più elevato pregio ambientale. Per questo motivo, analisi PSI classiche possono portare solamente all'identificazione di movimenti franosi solamente dove il tracciato in progetto si trovi nelle vicinanze di abitazioni o di manufatti. Essendo questo naturalmente una circostanza molto rara, vi è la necessità di sviluppare tecniche in grado di stimare i movimenti anche in aree non urbanizzate, mantenendo i pregi delle tecniche classiche, come la vasta copertura areale e la rapidità di esecuzione,

aumentandone però la copertura spaziale in termini di coerenza. Infatti, la bassa coerenza determina la perdita del dato. Nonostante questo, l'InSAR è stato usato con successo da molti autori per identificare e monitorare i movimenti delle frane (Casagli et al., 2016; Zhou et al., 2009; Riedel et al., 2008; Singhroy et al., 2007; Hilley et al., 2004) ed è stata già proposta come metodo per individuare e monitorare i movimenti franosi lungo i tracciati delle pipeline (Bayirli, 2018; Hole et al., 2011)

Oggi, la nuova generazione di satelliti Sentinel è caratterizzata da baseline temporali e normali molto ridotte. Per questo motivo questi dati sono assai propensi ad essere processati con tecniche multi-interferogramma. Tuttavia, per coprire vaste aree, le tecniche che prevedono l'unwrapping della fase, richiedono molto tempo, soprattutto nel caso di network ridondanti contenenti centinaia di interferogrammi. In questo lavoro, viene presentato un confronto tra i prodotti della tecnica classica PSI e una sua variante, denominata dagli autori QPS (Quasi-PS) (Perissin & Wang, 2011).

5.1.2. Obiettivi e metodi

Uno dei contributi più significativi che l'interferometria radar satellitare può dare alla progettazione di una infrastruttura lineare, di qualunque tipo esso sia (strade, pipeline ecc.), è fornire un'idea generale, anche preliminare, di quello che può essere il dissesto lungo un tracciato, sia per valutarne la fattibilità, sia per posizionarne le eventuali varianti in aree stabili. Questo discorso è valido soprattutto per quelle opere che si sviluppano anche per centinaia di chilometri, in aree dove è possibile anche non avere, a priori, alcun tipo di informazione geologica e geomorfologica.

In questo studio è proposta una metodologia di analisi basata sull'algoritmo QPS, applicata lungo dei probabili tracciati. Le aree scelte ricadono in alcune zone dell'Italia centrale perché in queste regioni sono disponibili delle buone mappe di aree suscettibili al dissesto, come il PAI (Piano di Assetto Idrogeologico), utili per validare i risultati.

I tracciati percorrono aree collinari/montane, dove il cambiamento delle proprietà fisiche del terreno, come la riflettività, l'umidità, l'uso del suolo e la vegetazione, sono le cause principali della decorrelazione temporale, e quindi della perdita di coerenza. Queste zone, come visto nei capitoli precedenti, possono essere descritte come gruppi di riflettori distribuiti (DS) dai quali è possibile estrarre informazioni applicando un filtro spaziale. L'operazione di filtraggio più semplice che comunemente viene applicata alle immagini SAR è il *multilooking*. Tuttavia, permane il limite della decorrelazione temporale, funzione del sensore (lunghezza d'onda), delle proprietà fisiche del suolo e delle condizioni climatiche. L'unico modo per ottenere

informazioni utili dai DS è ridurre l'intervallo temporale tra un'acquisizione e la successiva. I satelliti Sentinel-1, insieme ai ridotti valori di baseline normale, forniscono infatti immagini ogni soli sei giorni. Questo li rende ideali per applicazioni di questo genere.

La tecnica utilizzata in questo studio permette di estrarre informazioni da target parzialmente coerenti, incrementando la distribuzione spaziale dei punti di misura. L'algoritmo è frutto di alcune modifiche all'originale tecnica PS. Ogni immagine del dataset non deve più necessariamente correlarsi ad un'unica immagine master, infatti i parametri dei bersagli (altezza e spostamento) sono stimati solamente attraverso l'analisi del sottoinsieme di interferogrammi nei quali essi siano coerenti. Naturalmente è applicato un filtraggio spaziale per aumentare il rapporto segnale rumore. Queste modificazioni all'algoritmo originale PS permettono di ottenere informazioni dai DS, tuttavia

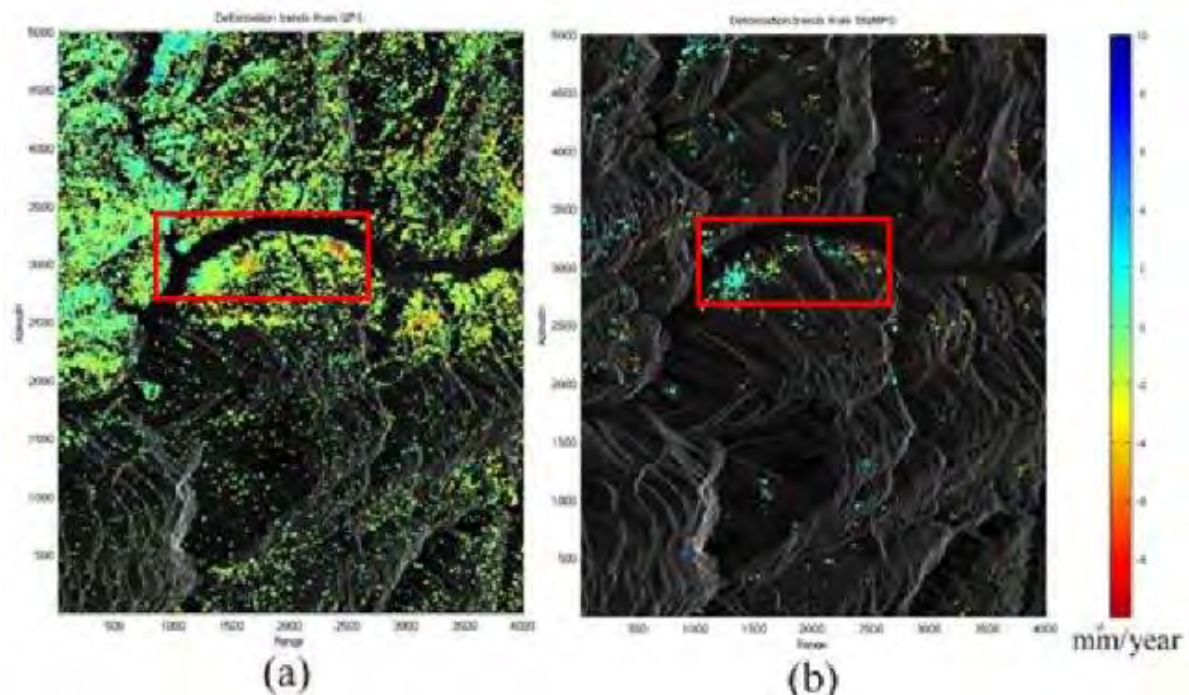


Fig. 5.1. Esempio sul differente numero di bersagli analizzabili utilizzando le due diverse tecniche. a) QPS; b) PSI. Da Wang et al., 2008

introducendo perdite di accuratezza e di risoluzione. Per questo motivo la tecnica PSI e quella QPS sono da considerarsi complementari, e non alternative tra loro. In entrambe le tecniche i parametri sono stimati massimizzando la coerenza della fase in ogni pixel. L'innovazione introdotta dall'algoritmo QPS risiede nell'introduzione del valore della coerenza spaziale come peso nel processo di stima dei parametri, per identificare l'informazione utile e scartare il rumore. In questo studio è stato utilizzato un approccio a network ridondante, imponendo come valori massimi di baseline normale 50 metri e 60 giorni per la baseline temporale. Teoricamente,

all'interno di questo network, ogni pixel possiede la sua rispettiva catena di interferogrammi ottimizzata per massimizzare la coerenza. In questo modo, a differenza della tecnica PSI, un pixel non deve essere necessariamente coerente in ogni interferogramma.

Ad oggi questa tecnica è implementata nel software SARPROZ (Perissin et al., 2011) e in MintPY (Yunjun, et al., 2019), tuttavia quest'ultimo richiede l'unwrapping di ogni interferogramma, un processo che richiede molto tempo. Inoltre, in SARPROZ, è prevista la diretta possibilità di inserire un tracciato ed analizzare solamente i pixel contenuti in un buffer costruito attorno ad esso (Fig 5.2.). Questo permette di diminuire i tempi di calcolo notevolmente. In questo lavoro gli interferogrammi sono filtrati con un filtro Goldstein adattativo e un fattore di *multilooking* di 8 in range e 10 in azimuth. La correzione atmosferica è la stessa del metodo PSI classico utilizzato nel capitolo quattro. Le analisi utilizzano l'intero dataset Sentinel disponibile dal 2015 fino a metà 2019.

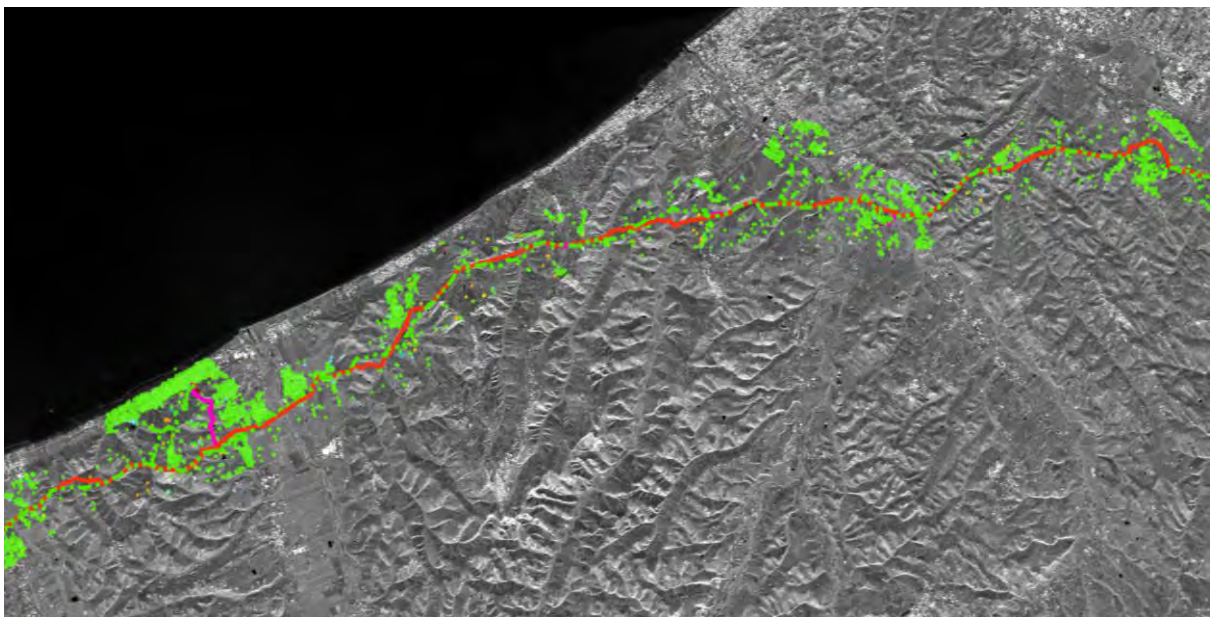


Fig. 5.2. Analisi PSI lungo un tracciato. L'area di analisi è ristretta lungo una buffer zone. L'immagine di sfondo è una reflectivity map realizzata calcolando il valore medio di ampiezza di ogni pixel per l'intero dataset.

5.1.4. Risultati

In questa sezione vengono presentati alcuni risultati delle analisi condotte su alcuni tracciati ipotetici, localizzati in aree collinari/montuose, con una bassa densità abitativa, perlopiù attraversanti aree agricole e pianure di fondovalle.

L'approccio seguito in questo lavoro è stato quello di effettuare in un primo momento un'analisi PSI classica per poi procedere all'analisi QPS vera e propria. In questo modo è stato possibile individuare le aree in movimento considerando entrambi i risultati, poiché il filtraggio degli

interferogrammi va inevitabilmente ad eliminare i bersagli puntuali, che comunque possono esistere nelle immediate vicinanze di un tracciato, e forniscono comunque le migliori stime di movimento. Come anticipato, mentre l'analisi PSI è stata condotta in un'areale più ampio, anche per consentire un'adeguata correzione della fase atmosferica, l'analisi QPS è stata eseguita solo lungo i tracciati, all'interno di una buffer zone. Questo consente di ridurre notevolmente i tempi di esecuzione, poiché i candidati QPS possono essere centinaia di migliaia in più di quelli PS.

L'analisi è stata volutamente eseguita in modo areale, coprendo settori lunghi più di 100 chilometri. Dopo uno screening iniziale, le aree anomale possono essere analizzate nuovamente, in dettaglio, per evitare eventuali fenomeni di decorrelazione dal punto di riferimento comune e rendere i risultati più attendibili e precisi. Nella figura seguente sono inseriti i risultati relativi ad un'analisi PSI classica in territorio collinare, in un'area molto ampia del centro Italia. È possibile notare che i PS sono quasi esclusivamente presenti nelle aree urbanizzate costiere e lungo il fondovalle, dove naturalmente sono presenti più edifici e manufatti antropici. I PS sono decine di migliaia e possono comunque dare delle informazioni molto importanti. Se questo tipo di analisi fosse stata condotta in un'area semidesertica, i PS sarebbero stati molto di più. Per questo motivo la scelta della tecnica da utilizzare è direttamente collegata al contesto morfoclimatico nel quale si trova l'area da analizzare.

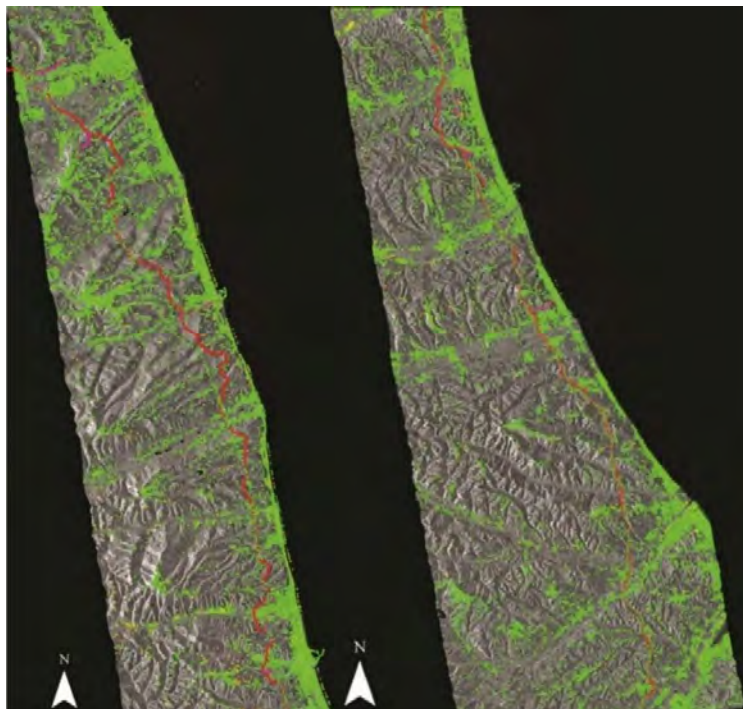


Fig. 5.3. *Analisi PSI areale. I PS sono molto numerosi, tuttavia questi sono perlopiù in corrispondenza di edifici.*

Per presentare i risultati derivanti delle analisi sono stati scelti degli esempi peculiari nei quali sono messi a confronto sia i PS che i QPS. Inoltre, nelle immagini, sono inserite le aree PAI per fornire un veloce confronto con quello che è attualmente uno dei metodi più utilizzati per valutare il rischio globale da frana. In questo modo è possibile anche dare una prima validazione ai dati prodotti.

Il dato di spostamento è indicato come velocità media annuale, espressa lungo la linea di vista del satellite. Per questo motivo colori che vanno dal rosso al blu indicano, rispettivamente, movimenti in allontanamento e in avvicinamento dal sensore, perciò aree considerabili critiche (sopra un determinato valore soglia) dal punto di vista della deformazione. Il colore verde invece caratterizza invece quelle che sono le aree considerabili stabili.

Nell'immagine seguente è inserito il primo di una serie di esempi nel quale è possibile apprezzare i risultati ottenibili con la tecnica QPS. L'analisi è stata eseguita lungo un ipotetico tracciato lungo un centinaio di chilometri. Visivamente è già possibile notare alcune aree anomale, che corrispondono a zone a probabile rischio frana. Queste sono indicate nell'immagine con dei riquadri rossi.

Questo tipo di risultato può rappresentare già uno screening preliminare della franosità di un'area, utile per guidare analisi più approfondite ed avere conferme su quelle che erano già considerate aree a basso rischio, o stabili.

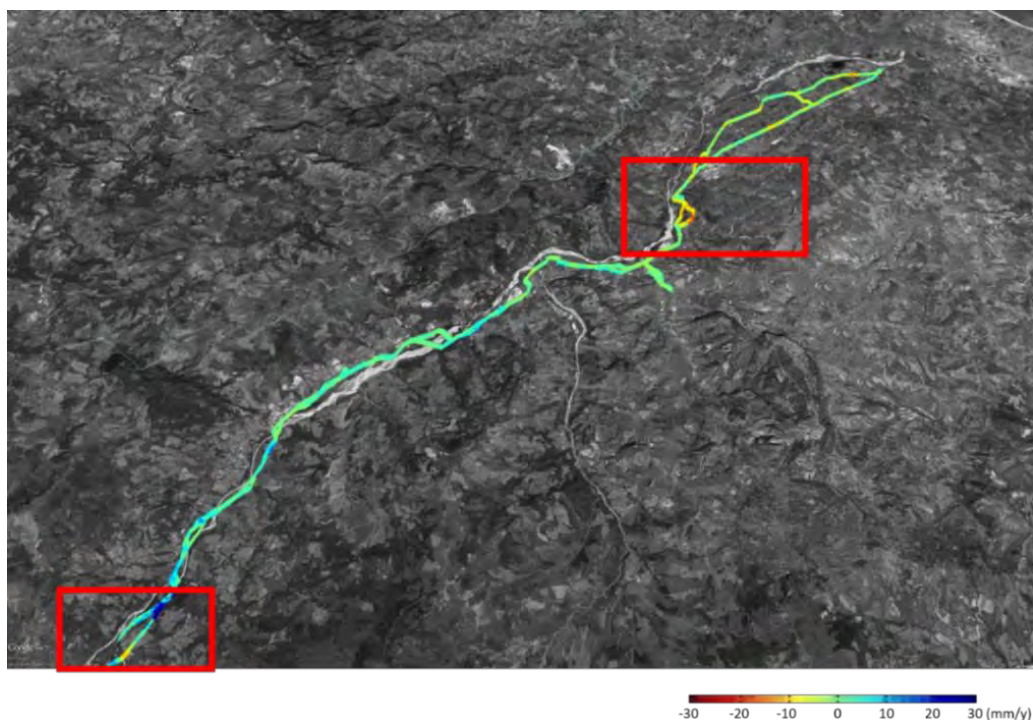


Fig. 5.4. Analisi QPS lungo un tracciato. Le aree colorate di rosso o di blu corrispondono ad anomalie che possono indicare zone in movimento. Due di queste sono evidenziate dai rettangoli rossi.

Nella figura seguente è inserito un close-up dell'area indicata con un rettangolo rosso (in alto a destra) nella figura precedente (Fig. 5.4). Qui, come in quelle che seguono più avanti, sono inseriti prima i risultati dell'analisi PSI, e poi aggiunti i risultati QPS. Inoltre, sono inseriti il tracciato di riferimento e i poligoni delle aree suscettibili a rischio frana individuate dal PAI. In questo caso l'area è caratterizzata dalla presenza di un buon numero di abitazioni che fungono da ottimi bersagli per la tecnica PSI. Infatti, già dai risultati di questa è possibile intuire un fenomeno gravitativo di vaste dimensioni che interessa l'area immediatamente sotto il paese e quella prospiciente al fiume. Questo è confermato anche dai risultati QPS, che individuano tutta l'area come in movimento, presentando valori di velocità più alti proprio in corrispondenza di una frana individuata dal PAI.

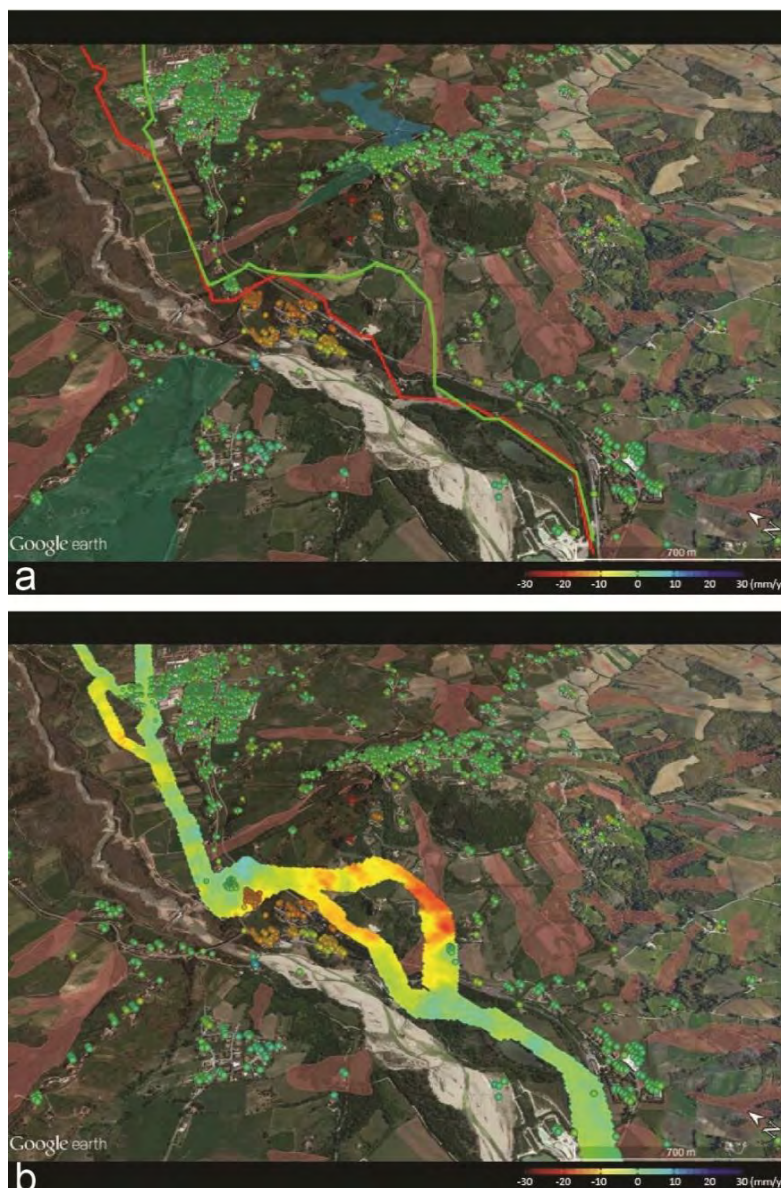


Fig. 5.6. Risultati delle analisi interferometriche. Il colore dei target rappresenta la loro velocità media annuale lungo la LOS. **a)** Risultati dell'analisi PSI; **b)** Risultati dell'analisi PSI + QPS. I poligoni indicano le aree PAI.

Nella figura seguente invece, viene mostrato un altro esempio, in un'area costiera. In questo caso i PS sono presenti solamente nelle aree di pianura e dove sono presenti le abitazioni lungo la costa. Tuttavia, è possibile osservare dei PS che presentano velocità anomale, individuando un'area in frana fuori dai limiti dell'area PAI indicata in rosso. Su questa non sono presenti un buon numero di riflettori. Inserendo però anche i QPS è possibile invece notare la quasi perfetta corrispondenza tra questi e l'area in dissesto, che conferma il movimento presunto della frana.

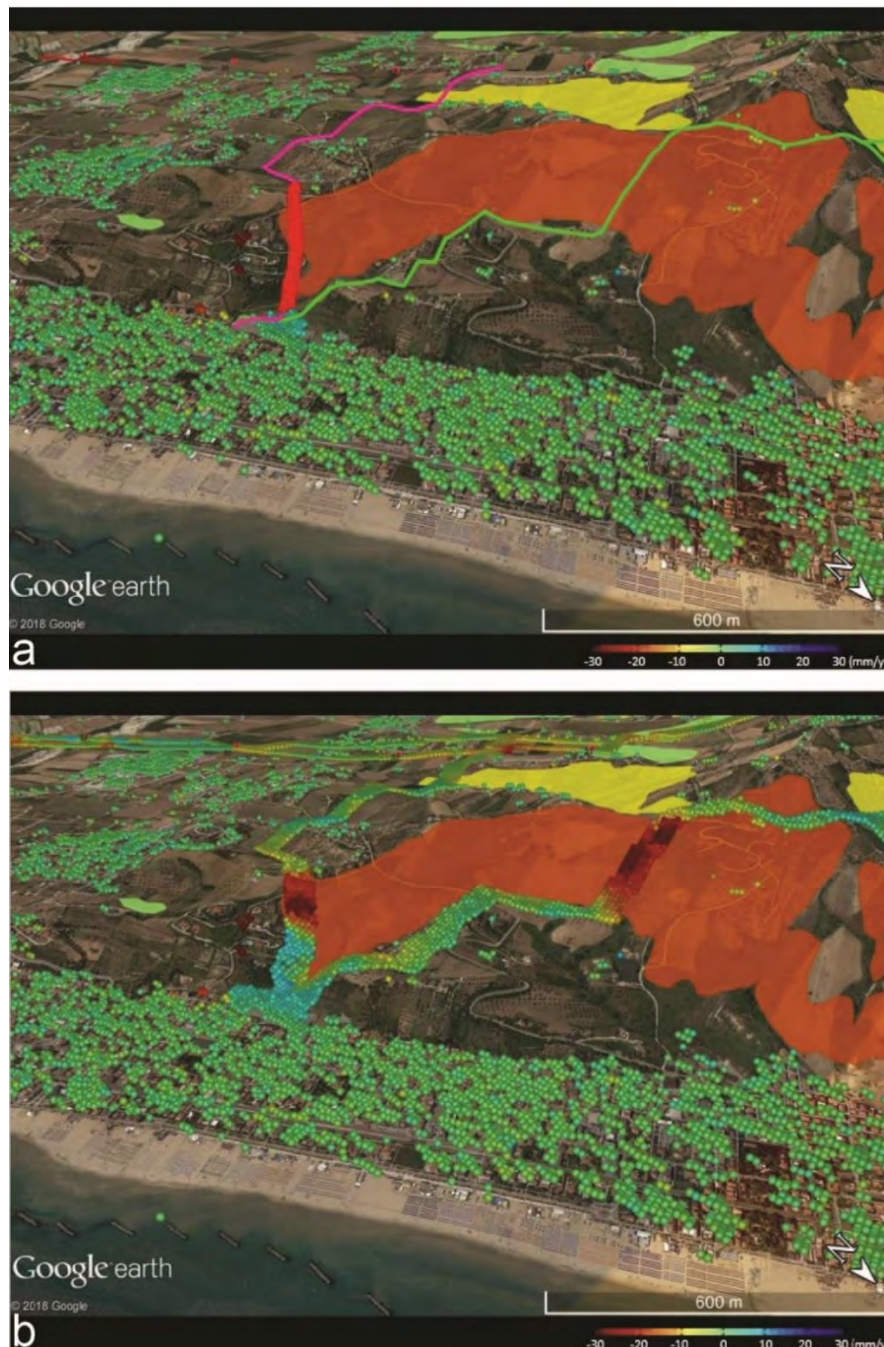


Fig. 5.6. Risultati delle analisi interferometriche. Il colore dei target rappresenta la loro velocità media annuale lungo la LOS. **a)** Risultati dell'analisi PSI; **b)** Risultati dell'analisi PSI + QPS. I poligoni indicano le aree PAI.

Infine, in quest'ultimo esempio è riportato un versante caratterizzato da diverse aree PAI classificate come frane quiescenti. L'analisi PS, come nell'esempio precedente, non fornisce indicazioni utili in merito. Invece i QPS testimoniano l'instabilità del versante, anche in zone non perimetrate dalla carta del dissesto.



Fig. 5.7. Risultati delle analisi interferometriche. Il colore dei target rappresenta la loro velocità media annuale lungo la LOS. **a)** Risultati dell'analisi PSI; **b)** Risultati dell'analisi PSI + QPS. I poligoni indicano le aree PAI.

5.1.5. Discussione e conclusioni

In questo lavoro viene proposta una metodologia di analisi interferometrica per lo screening preliminare della franosità in aree vaste. L'approccio utilizzato consiste nell'utilizzo congiunto della tecnica PSI e della tecnica QPS. Questa permette di massimizzare la coerenza temporale stimando i parametri da un subset di interferogrammi ottimizzato, a volte diverso, tra ogni singolo pixel. In questo modo è possibile estrarre le informazioni da target parzialmente coerenti, cioè che non mantengono coerenza elevata in tutti gli interferogrammi. In questo modo è possibile, riducendo sia la risoluzione spaziale che l'accuratezza, raggiungere un'elevata densità di punti di misura anche in aree non urbanizzate. Proprio per questo la tecnica è particolarmente promettente al fine di creare mappe preliminari di dissesto lungo i tracciati di infrastrutture lineari, anche molto estese in termini di lunghezza. L'approccio proposto è volto infatti a ridurre al minimo i tempi di esecuzione, evitando lo srotolamento della fase e producendo dati solamente nell'intorno del tracciato.

I risultati presentati mostrano una buona correlazione con quelle che sono le carte ufficiali del dissesto, mostrando anche l'attività di frane considerate quiescenti, o viceversa. Naturalmente, uno dei vantaggi che l'interferometria può portare nell'ambito della progettazione di un tracciato, è proprio quando non si hanno a disposizione dati simili. Inoltre, i risultati possiedono una ineguagliabile facilità di lettura rispetto ai metodi convenzionali e copertura spaziale rispetto ad altri metodi. Tuttavia, rimangono quelli che sono i limiti di fondo della tecnica. Infatti, restano invisibili i movimenti N-S e la deformazione è relativa, non assoluta, ed espressa lungo la linea di vista del satellite. Anche attraverso l'utilizzo di network ridondanti non è possibile ricavare informazioni in zone boschive o molto vegetate. Non sono rari falsi positivi, soprattutto nel fondovalle e lungo i versanti umidi. Per questo motivo i risultati necessitano di un'adeguata interpretazione e non sostituiscono in alcun modo il rilevamento sul terreno. Tuttavia, informazioni di questo tipo rappresentano sicuramente un valido aiuto, soprattutto nell'ambito della progettazione preliminare, in aree laddove, a volte, non è possibile accedere con semplicità a dati geologici e geomorfologici.

6. DISUSSIONE GENERALE E CONCLUSIONI

Durante il corso di dottorato di ricerca, le tecniche di interferometria radar satellitare sono state applicate nell'ambito di diversi progetti che, affrontando diverse tipologie di deformazione e diverse scale di analisi spaziali e temporali, permettono di effettuare un'analisi critica delle potenzialità, e dei limiti, di queste tecniche in riferimento all'individuazione e al monitoraggio dei rischi geologici lungo le infrastrutture lineari.

Il tracciato di un'infrastruttura lineare può interessare ambiti territoriali anche per diverse centinaia di chilometri, attraversando aree geologicamente complesse. Per questo motivo, come ampiamente trattato, la progettazione e la realizzazione di un'infrastruttura non possono prescindere da un'analisi attenta delle variabili di rischio geologiche (*geohazard*) e dell'interazione che tale struttura può avere con il territorio.

Già a partire dagli anni '90 la disponibilità dei dati SAR ed il conseguente sviluppo di nuove tecniche di elaborazione dei dati, ha portato ad una crescita nell'utilizzo dell'interferometria per lo studio delle deformazioni superficiali del terreno indotte da fenomeni naturali quali subsidenza, attività vulcanica, terremoti ecc. Negli ultimi anni in particolare, grazie alle missioni Sentinel-1, l'utilizzo dei dati radar può estendersi da un ambito prettamente di ricerca o specialistico, ad un uso più operativo per l'individuazione e il monitoraggio dei rischi naturali, ad integrazione delle tecniche convenzionali.

Lo sforzo principale di questa ricerca è stato quello di implementare e testare in autonomia le diverse metodologie per produrre dati interferometrici e valutarne sia i pro che i contro, cercando di delineare delle linee guida per affrontare i diversi ambiti di applicazione nel miglior modo, e minor tempo, possibili. Le applicazioni effettuate nei tre anni hanno avuto quindi un duplice scopo: da una parte individuare, nell'ambito delle numerose tipologie deformative, quelle che presentano caratteristiche favorevoli al monitoraggio con dati SAR, dall'altra di delineare le potenzialità di impiego della tecnica in riferimento alle esigenze che incorrono in fase di fattibilità, progettazione e costruzione di una infrastruttura lineare. La prima finalità è stata raggiunta con le valutazioni derivanti dai risultati conseguiti sui fenomeni oggetto del presente studio. Le tipologie di fenomeni sulle quali è stata concentrata l'analisi sono state la tettonica attiva, la subsidenza indotta e i fenomeni franosi.

La seconda finalità è stata affrontata andando indagare i fenomeni dal punto di vista del progettista. Ad esempio, nell'ottica della progettazione di un'opera attraversante un'area tettonicamente attiva, soggetta a forti eventi sismici, studi di questo tipo possono rappresentare

l'opzione più semplice ed economica per caratterizzare un'area ed individuare aree potenzialmente critiche, non solo lungo la struttura principale. Questo è possibile facendo tesoro delle informazioni ricavabili da eventi precedenti, che permettono di creare archivi contenenti le aree che hanno subito deformazione cosismica. Questo è possibile perché l'interferometria può essere effettuata con dati storici. Le analisi multi-temporali, invece, possono essere utili per valutare il movimento asismico delle faglie attive. Questo è messo in luce soprattutto dallo studio effettuato sull'Etna al capitolo 3, dove sono individuate diverse strutture con questo tipo di comportamento. In questo modo è possibile ricavare con buona precisione i valori di spostamento utili alla scelta di adeguate soluzioni progettuali.

Per quanto riguarda invece la subsidenza, è naturalmente possibile indagarne la presenza prima della costruzione di un'opera. Tuttavia, un progettista è soprattutto interessato a verificare, o a monitorare, quali possano essere stati gli effetti indotti dalla costruzione di un'opera. L'analisi interferometrica infatti può rappresentare un metodo di analisi veloce e preciso per individuare, o escludere, le possibili deformazioni indotte sugli edifici circostanti un tracciato di nuova costruzione, soprattutto sotterraneo.

Infine, uno dei contributi più significativi che l'interferometria radar satellitare può dare alla progettazione di una infrastruttura lineare, di qualunque tipo esso sia (strade, pipelines ecc.), è fornire un'idea generale, anche preliminare, di quello che può essere il dissesto lungo il tracciato, per valutarne la fattibilità, ma anche per guidarne le eventuali varianti in aree stabili. Pertanto, partendo direttamente affrontando il problema della produzione stessa del dato interferometrico, è stato così possibile definire alcune linee guida per l'utilizzo operativo dell'informazione fornita dal dato radar satellitare nelle diverse fasi di caratterizzazione spaziale e temporale dei fenomeni deformativi.

In questo lavoro di ricerca è stato privilegiato l'utilizzo del dato Sentinel-1. Questo è dovuto chiaramente alla politica open access effettuata dall'ESA, che fornisce gratuitamente il dato. Inoltre, la banda C risulta essere il compromesso migliore per indagare le diverse tipologie di fenomeno. Infatti, mentre la banda L è maggiormente indicata all'analisi di fenomeni deformativi di natura tettonica, la banda x è invece ideale per il monitoraggio ad alta risoluzione degli edifici, dal punto di vista strutturale e ingegneristico. La banda L non è adatta a questo scopo, come la banda x, estremamente ridotta, non è l'ideale per monitorare, ad esempio, la deformazione indotta da terremoti. La banda C, dei Satelliti Sentinel, è invece un ottimo compromesso per assolvere a tutti questi compiti. In aggiunta a questo, è bene ricordare la copertura planetaria di questa missione e i tempi di revisit molto brevi. Infine, con i suoi

predecessori ERS ed Envisat, è l'unica missione che presenta una continuità significativa ed abbastanza omogenea dal 1992.

Indiscutibilmente si può constatare che i principali vantaggi maggiori dati dall'interferometria sono l'economicità rispetto ai metodi convenzionali, la copertura spaziale e la velocità di esecuzione. Inoltre, i risultati, anche se necessitano di un'interpretazione consapevole ed esperta, sono indiscutibilmente maggiormente intellegibili dai diversi attori che gravitano attorno alla progettazione e alla costruzione di un'opera.

L'economicità deriva soprattutto dal rapporto quantità di dati ottenuti/numero di strumenti impiegati. Infatti, l'InSAR non prevede il dispiegamento nell'area di costosi apparati, come le nel caso delle tecniche convenzionali. Nei casi ottimali, come in quelli del capitolo 4, l'interferometria fornisce risultati con copertura spaziale ineguagliabile. Inoltre, l'InSAR è fattibile anche laddove non è possibile, per problemi di sicurezza o altro, inviare del personale. Questo è garantito dalla copertura planetaria del dato SAR.

Per quanto riguarda la velocità di esecuzione, questa dipende soprattutto da una scelta consapevole delle tecniche da usare e dalla infrastruttura software/hardware che si possiede. Infatti, sono necessari ottime capacità di storage, un metodo di archiviazione efficiente ed un'adeguata potenza di calcolo.

Come è stato possibile leggere nell'ambito di questo lavoro, la scelta della tecnica da utilizzare dipende da molteplici fattori, tra i quali il fenomeno da indagare, la scala di analisi e soprattutto la presenza o meno di buoni riflettori a terra. Naturalmente, quando si è in presenza di edifici e di manufatti antropici la tecnica da privilegiare rimane indiscutibilmente la PSI. Questo sia in termini di accuratezza, precisione e velocità di esecuzione. Infatti, dai casi analizzati, questa produce ottimi risultati in aree urbane, richiedendo poco tempo. Inoltre, l'analisi PSI può dare buoni risultati anche in aree desertiche, con bassi valori di umidità del suolo, aree spesso attraversate da infrastrutture lineari. Tuttavia, per molti ambiti di applicazione, come per la tettonica attiva e lo screening della franosità, l'approccio da utilizzare si sposta su quelli DS. Questi richiedono molto più tempo, ma sono gli unici che forniscono risultati laddove non c'è la presenza di riflettori puntuali. Sviluppi futuri della tecnica interferometrica punteranno sempre di più all'integrazione dei target puntuali e distribuiti, attraverso l'applicazione di filtri adattativi avanzati, seguendo la strada intrapresa dall'algoritmo SqueeSARTM (Ferretti et al., 2011).

Per quanto riguarda la tettonica attiva, l'interferometria può, al momento, dare solamente un supporto alla caratterizzazione geologica di un'area. Infatti, è di aiuto nel rilevamento delle rotture cosismiche e delle deformazioni areali (cosismiche e non). Nell'ambito di una

progettazione, questi dati, in relazione ad eventi sismici precedenti, possono essere d'aiuto a adottare particolari scelte progettuali. Non è tuttavia utile laddove esiste solo sismicità storica rilevante e non sono presenti fenomeni importanti di deformazione asismica.

Per quanto riguarda l'applicazione dell'interferometria ai movimenti franosi, questo forse rimane il caso più complesso, ma anche quello con più riscontri nell'ambito della progettazione. Molto dipende dalla scala di indagine. L'interferometria, come trattato nel capitolo 5 può permettere, attraverso lo sfruttamento dei DS, di produrre velocemente delle mappe preliminari di franosità anche di aree molto vaste. A piccola scala, con l'utilizzo dei PS e di bersagli artificiali, come i *corner reflector*, l'interferometria permette di analizzare in dettaglio il comportamento di un corpo franoso nel tempo. Tuttavia, è proprio con i movimenti gravitativi che l'interferometria, in alcuni casi, mostra i suoi maggiori limiti, perlopiù dovuti ai limiti intrinseci delle tecniche radar. La principale limitazione è dovuta alla possibilità di misurare solamente movimenti franosi caratterizzati da un'evoluzione lenta, o molto lenta. Deformazioni più veloci possono infatti essere equivocate, o addirittura non essere rilevabili, poiché provocano problemi di decorrelazione temporale che riducono o compromettono la qualità dei risultati dell'analisi. Un ulteriore limite all'applicabilità della tecnica riguarda la difficoltà, o spesso l'impossibilità di ricavare misure di deformazione in presenza di fitta vegetazione. Inoltre, non sono visibili movimenti N-S e, al momento, non è possibile una scomposizione tridimensionale del movimento. Un'ultima problematica da considerare riguarda la relatività delle misure. Le misure di deformazione dei dati PS e DS vengono riferite alla posizione di un punto di riferimento a terra di coordinate note (*reference point*) e possono essere quindi soggette a offset indotti dai movimenti cui è soggetto il punto di riferimento stesso. Tali offset possono essere rimossi in fase di processing o di post processing ma possono indurre un errore al confronto quantitativo delle misure interferometriche satellitari con i dati in situ (inclinometri, misure GPS, ecc.).

Tuttavia, l'interferometria radar satellitare è tuttora un campo in continuo sviluppo e molti di questi limiti verranno superati nei prossimi anni con il lancio di nuove missioni e lo sviluppo di ulteriori tecniche di analisi.

Lo scopo di questo lavoro di tesi era quello di indagare le potenzialità dei dati di nuova generazione Sentinel e delle tecniche interferometriche applicate alla progettazione di infrastrutture lineari. Con le considerazioni emerse dalla valutazione critica dei risultati ottenuti nei vari progetti nell'ambito del dottorato, sono state confermate e messe in luce le numerose aspettative per quanto riguarda la potenzialità del dato SAR per la valutazione rapida dei rischi geologici lungo le infrastrutture lineari. L'InSAR, è una metodologia che può essere

implementata molto rapidamente in ogni fase della vita di un'opera, dall'analisi di fattibilità fino alla sua dismissione.

Il futuro dell'interferometria satellitare appare roseo, con la possibilità di avere molto presto tempi di *revisit* ridotti e risultati ancora più soddisfacenti. Per questo motivo, sviluppi futuri, probabili, riguarderanno soprattutto la possibilità di usufruire di servizi cloud di computing per la produzione di dati interferometrici. Inoltre, si prospetta nel prossimo futuro la possibilità di incrociare dati multiplatforma e di analizzare i risultati sfruttando algoritmi di deep learning, per fornire interpretazioni, soluzioni efficaci ed *alert* in tempo quasi-reale.

Bibliografia

ACQUAOTTA, F.; FACCINI, F.; FRATIANNI, S.; PALIAGA, G.; SACCHINI, A. (2018) Rainfall intensity in the Genoa metropolitan area (northern Mediterranean): Secular variations and consequences. *Weather* 2018, 73, 356–362.

ACQUAOTTA, F.; FACCINI, F.; FRATIANNI, S.; PALIAGA, G.; SACCHINI, A.; VILÌMEK, V. (2018) Increased flash flooding in Genoa metropolitan area: A combination of climate changes and soil consumption? *Meteorol. Atmos. Phys.* 2018.

AZZARO R.; CARVENI P.; LO GIUDICE, E.; RASÀ, R. (1989) Il terremoto di Codavolpe (basso versante orientale etneo) del 29 gennaio 1989: campo macrosismico e fratturazione cosismica. *Boll. G.N.V.*, 1, 1-12.

AZZARO, R. (1999) Earthquake surface faulting at Mount Etna volcano (Sicily) and implications for active tectonics, *J. Geodynam.*, 28, 193-213.

AZZARO, R. (2004) Seismicity and active tectonics in the Etna region: constraints for a seismotectonic model, In: *Mt. Etna: volcano laboratory*, A. Bonaccorso, S. Calvari, M. Coltelli, C. Del Negro and S. Falsaperla (eds.), American Geophysical Union, Geophysical monograph, 143, 205-220.

AZZARO, R.; BRANCA, S.; GWINNER, K.; COLTELLI, M. (2012) The volcano-tectonic map of Etna volcano, 1:100.000 scale: an integrated approach based on a morphotectonic analysis from high-resolution DEM constrained by geologic, active faulting and seismotectonic data, *It. J. Geosci.*, 131, 153-170

AZZARO, R.; S. D'AMICO, S.; ROTONDI, R.; TUVÈ T.; ZONNO, G. (2013) Forecasting seismic scenarios on Etna volcano (Italy) through probabilistic intensity attenuation models: a Bayesian approach, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 251 149-157.

BAMLER R.; JUST. D., (1993) Phase statistics and decorrelation in SAR interferograms. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1993, IGARSS93 Better Understanding of Earth Environment*, 18-21 pp 980-984

BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E. (2002) “A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 11, pp. 2375–2383, Nov. 2002

- BAYIRLI, S., (2018) Using satellite InSAR in the gas and oil industry; route analyses and continuous pipeline coverage analyses. Abstract in the 13th Pipeline Technology Conference, 12-14 March 2018, Berlin, Germany.
- BONACCORSO, A.; ALOISI, M.; MATTIA, M. (2002) Dike emplacement forerunning the Etna July 2001 eruption modeled through continuous tilt and GPS data. *Geophysical Research Letters*, 29, 13.
- BOCK, Y.; WADOWINSKI, S.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; FUMAGALLI, A. (2012) Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar: RESEARCH LETTER.
- BONANNO, A.; PALANO, M.; PRIVITERA, E.; GRESTA, S.; PUGLISI, G. (2011) Magma intrusion mechanisms and redistribution of seismogenic stress at Mt. Etna volcano (1997-1998). *Terra Nova* 23, 339–348. h
- BRANCA, S.; COLTELLI, M.; GROPELLI, G.; LENTINI, F. (2011) Geological map of Etna volcano, 1:50,000 scale, *Ital. J. Geosci.*, 130(3), 265–291
- BRANDOLINI, P.; FACCINI, F.; PALIAGA, G.; PIANA, P. (2018) Man-made landforms survey and mapping of an urban historical center in a coastal Mediterranean environment. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 2018, 41, 23–34.
- BRUNO, V.; MATTIA, M.; ALOISI, M.; PALANO, M.; CANNAVÒ, F.; HOLT, W.E. (2012) Ground deformations and volcanic processes as imaged by CGPS data at Mt. Etna (Italy) between 2003 and 2008, *J. Geophys. Res.*, 117
- BURLAND, J.B.; MAIR, R.; STANDING, R.N. (2004) Ground performance and building response due to tunnelling. In *Proceedings of the Conference on Advances in Geotechnical Engineering*, London, UK, 29–31 March 2004; Volume 1, pp. 291–342.
- CAPPONI, G.; CRISPINI, L. (2008) Note Illustrative Della Carta Geologica d'Italia Alla Scala 1:50.000 Foglio 213 Genova [Explanatory Notes of the Geological Map of Italy, 1:50000 Scale, Sheet 213 Genova]; SELCA: Firenze, Italy, 2008.
- CASAGLI, N.; CIGNA, F.; BIANCHINI, S.; HÖLBLING, D.; FÜREDER, P.; RIGHINI, G.; DEL CONTE, S.; FRIEDL, B.; SCHNEIDERBAUER, S.; IASIO, C.; VLCKO, J.; GREIF, V.; PROSKE, H.; GRANICA, K.; FALCO, S.; LOZZI, S.; MORA, O.; ARNAUD, A.; NOVALI, F.; BIANCHI, M., (2016) Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote

sensing: examples from the ECFP7 project SAFER. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4, 92-108.

CAMPBELL, J.B. (2002) *Introduction to remote sensing*. The Guilford Press, pp. 280.

CATALAO, J.; NICO, G.; CONDE, V. (2011) Detection of Ground Subsidence in the City of Lisbon: Comparison of InSAR and topographic Measurements. In *Proceedings of the 2011 IEEE Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, Munich, Germany, 11–13 April 2011; pp. 417–420.

Chaussard, E.; Wdowinski, S.; Cabral-Cano, E.; Amelung, F. (2014) Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series.

CHEN, C.W.; ZEBKER, H.A. (2000) "Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms", *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 17, pp. 401-414.

CHIARALUCE, L.; DI STEFANO, R.; TINTI, E.; SCOGNAMIGLIO, L.; MICHELE, M.; CASAROTTI, E.; CATTANEO, M.; DE GORI, P.; CHIARABBA, C.; MONACHESI, G.; LOMBARDI, A.; VALOROSO, L.; LATORRE, D.; MARZORATI, S. (2017) The 2016 central Italy seismic sequence: a first look at the mainshocks, aftershocks, and source models *Seismological Research Letters* (March 2017) 88 (3): 757-771

COLESANTI, C.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F. (2003) SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003, 41, 1685–1701.

CROSETTO, M.; MONTSERRAT, O.; BREMMER, C.; HANSSSEN, R.; CAPES, R.; MARSH, S. (2009) Ground motion monitoring using SAR interferometry: Quality assessment. *Eur. Geol.* 2009, 26, 12–15.

CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; DEVANTHÉRY, N.; CRIPPA, B. (2016) Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2016, 115, 78–89.

CRUDEN, D.M.; VARNES, D.J. (1994) *Landslide Types and Processes*. In: "Landslides: Investigation and Mitigation" Transportation Research Board National Academy of Sciences.

DE GUIDI, G.; BRIGHENTI, F.; CARNEMOLLA, F.; IMPOSA, S.; MARCHESE, S.A.; PALANO, M.; SCUDERO, S.; VECCHIO, A. (2018) The unstable eastern flank of Mt. Etna volcano (Italy): First results of a GNSS-based network at its southeastern edge. *J. Volcanol. Geotherm.Res.* 357, 418–424

- DOORNKAMP, J.C. (1989) In: G.J.H. McCall and B.R. Marker (Eds), “Earth Science Mapping for Planning, Development and Conservation”, pp. 157-173.
- FACCINI, F.; LUINO, F.; SACCHINI, A.; TURCONI, L.; de Graff, J.V. (2015) Geohydrological hazards and urban development in the Mediterranean area: An example from Genoa (Liguria, Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2015, 15, 2631–2652.
- FACCINI, F.; PALIAGA, G.; PIANA, P.; SACCHINI, A.; WATKINS, C. (2016) The Bisagno stream catchment (Genoa, Italy) and its major floods (1822, 1970 and 2014): Geomorphic and land use variations in the last three centuries. *Geomorphology* 2016, 273, 14–27.
- FACCINI, F.; LUINO, F.; PALIAGA, G.; SACCHINI, A.; TURCONI, L.; DE JONG, C. (2014) Role of rainfall intensity and urban sprawl in the 2014 flash flood in Genoa City, Bisagno catchment (Liguria, Italy). *Appl. Geogr.* 2018, 98, 224–241.
- FATTAHI, H.; AMELUNG, F. (2015) InSAR bias and uncertainty due to the systematic and stochastic tropospheric delay. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 120 (12), 8758–8773.
- FATTAHI, H.; AGRAM, P.; SIMONS, M. (2017) “A network-based enhanced spectral diversity approach for TOPS time-series analysis,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 55, no. 2, pp. 777–786, Feb. 2017. (<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7637021/>)
- FEREGGIANO Tunnel Official Website. Available online: <http://www.scolmatorefereggiano.it/index.php/it/> (accessed on 8 January 2019).
- FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. (2000) Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000, 38, 2202–2212.
- FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. (2001) Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2001, 39, 8–20.
- FERRETTI, A.; FUMAGALLI, A.; NOVALI, F.; PRATI, C.; ROCCA, F.; RUCCI, A. (2011) A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011, 69, 3460–3470.
- FIALKO, Y.; SANDWELL, D.; AGNEW, D.; SIMONS, M.; SHEARER, P.; MINSTER, B. (2002) Deformation on nearby faults induced by the 1999 Hector Mine earthquake, *Science*, 297, 1858–1862.

FIASCHI, S.; TESSITORE, S.; BONÌ, R.; DI MARTIRE, D.; ACHILLI, V.; BORGSTROM, S.; IBRAHIM, A.; FLORIS, M.; MEISINA, C.; RAMONDINI, M.; CALCATERRA, D. (2017) From ers-1/2 to sentinel-1: two decades of subsidence monitored through A-DinSAR techniques in the Ravenna area (Italy). *Giscience & Remote Sensing*, 54, 305-328.

FUJIWARA, S.; YARAI, H.; KOBAYASHI, T.; MORISHITA, Y., NAKANO, T.; MIYAHARA, B.; NAKAI, H.; MIURA, Y.; UESHIBA, H.; KAKIAGE, Y.; UNE, H. (2016) Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry. *Earth Planets Space* 68:160.

FUKUSHIMA, Y., TAKADA, Y., HASHIMOTO, M. (2013) Complex ruptures of the 11 April 2011 Mw 6.6 Iwaki earthquake triggered by the 11 March 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake, Japan. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 103:1572–1583.

GO-ELS LTD (2008) Investigation and Anlysis of Natural Hazard Impacts on Linear Infrastructure in Southern Kyrgyzstan. Desk and Field Studies Report. Prepared for: World Bank.

GRESTA, S., BELLA, D.; MUSUMECI, C.; CARVENI, P. (1997) Some efforts on active faulting processes (earthquake and aseismic creep) acting on the eastern flank of Mt. Etna (Sicily), *Acta Vulcanol.*, 9, 101–107.

GRESTA, S., PERUZZA, L., SLEJKO, D.; DISTEFANO, G. (1998) Inferences on the main volcano-tectonic structures at Mt. Etna (Sicily) from a probabilistic seismological approach, *J. Seismol.*, 2, 105–116.

GUARNIERI, A.M.; TEBALDINI, S. (2008) On the exploitation of target statistics for SAR interferometry applications, *Geoscience and Remote Sensing*. *IEEE Transactions on* 46 (11), 3436–3443.

GUERRIERI, L.; BAER, G.; HAMIEL, Y.; AMIT, R.; BLUMETTI A.M.; COMERCI, V.; DI MANNA, P.; MICHETTI, A.M.; SALAMON, A.; MUSHKIN, A.; SILEO, G.; VITTORI, E. (2010) InSAR data as a field guide for mapping minor earthquake surface ruptures: ground displacements along the Paganica Fault during the 6 April 2009 L’Aquila earthquake. *J. Geophys. Res.* 115: B12331.

HAEUSSLER, P.J.; SCHWARTZ, D.P.; DAWSON, T.E.; STENNER, H.D.; LIENKAEMPER, J.J.; SHERROD, B.; CINTI, F.R.; MONTONE, P.; CRAW, P.A.; CRONE, A.J.; PERSONIUS, S.F. (2004) Surface rupture and slip distribution of the Denali and

Totschunda faults in the 3 November 2002 M 7.9 earthquake, Alaska, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94(6B), S23–S52.

HILLEY, G.E.; BURGMANN, R.; FERRETTI, A.; NOVALI, F.; ROCCA, F. (2004) Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304, 1952–1955.

HOLE, J.; HOLLEY, R.; GIUNTA, G.; DE LORENZO, G.; THOMAS, A. (2011) InSAR assessment of pipeline stability using compact active transponders. *Proceedings of the Fringe 2011 Workshop, Frascati, Italy, 19-23 September 2011*.

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), 2004

HUANG, M.; FIELDING, E.J.; LIANG, C.; MILILLO, P.; BEKAERT, D.; DREGER, D.; SALZER, J.T. (2017) Coseismic deformation and triggered landslides of the 2016 Mw 6.2 Amatrice earthquake in Italy: The 2016 Amatrice EQ Coseismic Deformation.

IMPROTA, L.; LATORRE, D.; MARGHERITI, L.; NARDI, A.; MARCHETTI, A.; LOMBARDI, A.M.; CASTELLO, B.; VILLANI, F.; CIACCIO, M.G.; MELE, F.M.; ET AL. (2019) Multi-segment rupture of the 2016 Amatrice-Visso-Norcia seismic sequence (central Italy) constrained by the first high-quality catalog of Early Aftershocks. *Sci. Rep.* 2019, 9, 6921.

JOLIVET, R.; GRANDIN, R.; LASSERRE, C.; DOIN, M.-P.; PELTZER, G., (2011) Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17311, doi:10.1029/2011GL048757

JOLIVET, R.; AGRAM, P.; LIU, C. (2012) Python-based Atmospheric Phase Screen estimation - User Guide (2012), <http://earthdef.caltech.edu>.

KAMPES, B.M. (2006) *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2006.

KRIVENKO, A.; RIEDEL, B.; NIEMEIER, W.; SCHINDLER, S.; HEEK, P.; MARK, P.; ZIEM, E. (2012) Application of Radar Interferometry for Monitoring a Subway Construction Site. In *Proceedings of the Geomonitoring 2012, Braunschweig, Germany, 8–9 March 2012*; pp. 67–85.

- LEE, D.H.; KIM, B.H.; LEE, H.; KONG, J.S. (2009) Seismic behavior of a buried gas pipeline under earthquake excitations. *Eng. Struct.* 31 (5), 1011–1023.
- LIU, D.; SOWTER, A.; NIEMEIER, W. (2014) Process-related deformation monitoring by PSI using high resolution space-based SAR data: A case study in Düsseldorf, Germany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2014, 2, 4813–4830.
- LO GIUDICE, E; RASÀ, R. (1992) Very shallow earthquakes and brittle deformations in active volcanic areas: the Etnean region as an example. *Tectonophysics*, 202, 257-268.
- LOMBARDI, G. (1988) Les tassements exceptionnels au barrage de Zeuzier. *Publ. Soc. Suisse Méc. Sols Roches* 1988, 118, 39–47.
- MAHMUTOGLU, Y. (2011) Surface subsidence induced by twin subway tunnelling in soft ground conditions in Istanbul. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2011, 70, 115–131.
- MAIR, R.J.; TAYLOR, R.N.; BRACEGIRDLE, A. (1993) Subsurface settlement profiles above tunnels in clay. *Geotechnique* 1993, 43, 315–320.
- MASSONNET, D.; FEIGL, K.L. (1998) Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36. 441-500.
- MARINI, M. (1976) Frane intercotidali alla base del Pliocene e loro significato in rapporto alla tettonica distensiva tardoneogenica a Genova. *Mem. Dell'accademia Lunigianese Sci. Capellini* 1976, 40, 67–69.
- MARINOS, V.; STOUMPOS, G.; PAPATHANASSIOU, G.; GRENDAS, N.; PAPOULI, D.; PAPAZACHOS, C. (2016) Landslide geohazard for pipelines of natural gas transport. *Proceedings of the Geological Society of Greece*, vol. L, p. 845-853 *Proceedings of the 14th International Congress, Thessaloniki, May 2016*
- MARTOS, F. (1958) Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors. In *International Strata Control Congress*, Leipzig; Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Sektion für Bergbau: Berlin, Germany, 1958; pp. 191–205.
- MATHEW, F.; KWONG, J.; KAWAMURA, K. (2003) “Analysis of heave and subsidence risk for horizontal directional drilling.” *Pipeline Engineering and Construction International Conference 2003 July 13-16, 2003 | Baltimore, Maryland, United States (2003)*.
- MATTIA, M.; BRUNO, V.; CALTABIANO, T.; CANNATA, A.; CANNAVÒ, F.; D'ALESSANDRO, W.; DI GRAZIA, G.; FEDERICO, C.; GIAMMANCO, S.; LA SPINA, A.; LIUZZO, M.; LONGO, M.; MONACO, C.; PATANÈ, D.; SALERNO, G. (2015) A

comprehensive interpretative model of slow slip events on Mt. Etna's eastern flank, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 16, 635– 658

MENICHETTI, M., TIRINCANTI, E., PIACENTINI, D., ROCCHEGGIANI, M., TAMBURINI, A. (2017) Geometrical and structural controls on rupture zone fabric: field surveys of the 2016 earthquakes in Sibillini mountains (central Italy) - 36° GNGTS proceedings, Trieste 14-16 nov. 2017, 166-167.

MILILLO, P.; GIARDINA, G.; DEJONG, J.M.; PERISSIN, D.; MILILLO, G. (2018) Multi-Temporal InSAR Structural Damage assessment: The London Crossrail Case Study. *Remote Sens.* 2018, 10, 287.

MONACO, C.; TAPPONNIER, P.; TORTORICI, L.; GILLOT, P.Y. (1997) Late Quaternary slip rates on the Acireale-Piedimonte normal faults and tectonic origin of Mt. Etna (Sicily), *Earth Planet. Sci. Lett.*, 147, 125-139

MONACO, C.; DE GUIDI, G.; FERLITO, C. (2010) The morphotectonic map of Mt. Etna. *Ital.J. Geosci.* 129, 408–428.

NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 ARC Second. Version 3. Available online: <https://lpdaac.usgs.gov> (accessed on 8 January 2018).

NUTRICATO, R.; NITTI, D.O.; BOVENGA, F.; REFICE, A.; WASOWSKI, J.; CHIARADIA, M.T.; MILILLO, G. (2015) COSMO-SkyMed multi-temporal SAR interferometry over Liguria region for environmental monitoring and risk management. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Milan, Italy, 26–31 July 2015; pp. 1405–1408.

NYMAN, D.; LEE, E.M; AUDIBERT, J.M. (2008) Mitigating geohazards for international pipeline projects: challenges and lessons learned, IPC2008-64405, *Proceedings of IPC 2008, 7th International Pipeline Conference* Calgary, Canada.

O'REILLY, M.P.; NEW, B.M. (1982) Settlements above tunnels in the United Kingdom— Their magnitude and prediction. In *Proceedings of the Tunnelling; Institute of Mining Metallurgy*: London, UK, 1982; pp. 173–181.

PECK, R. (1969) Deep excavations and tunneling in soft ground. In *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, Mexico, 25–29 August 1969; pp. 225–290.

- PEPE, A.; LANARI, R. (2006) "On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 9, pp. 2374–2383, Sep. 2006.
- PERISSIN, D.; WANG, Z.; WANG, T. (2011) The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China. In *Proceedings of the ISRSE 2010*, Sidney, Australia, 10–15 April 2011.
- PERISSIN, D.; WANG, Z.; LIN, H. (2012) Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2012, 73, 58–67.
- PERISSIN, D.; WANG, T. (2012) Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 50 (1):271, 280
- PICARDI, G. (1995) *Elaborazione del segnale radar. Metodologie ed applicazioni*. Franco Angeli S.r.l. Milano, Italy.
- PORTER, M.; BAUMGARD, A.; SAVIGNY, K.W (2002) A hazard and risk management framework for largerock slope hazards affecting pipelines in mountainous terrain. *Proc. 4 International Pipeline Conference*, American Society of Mechanical Engineers, Calgary, Canada.
- PORTER, M; SAVIGNY, K.W. (2002) Natural hazard and risk management for South American pipelines. *Proc. 4 International Pipeline Conference*, American Society of Mechanical Engineers, Calgary, Canada.
- PORTER, M; SAVIGNY, K.W. (2002) Natural hazard and risk management for South American pipelines. *Proc. 4 International Pipeline Conference*, American Society of Mechanical Engineers, Calgary, Canada.
- PORTER, M.; ESFORD, F.; SAVIGNY, K.W. (2004) Andean pipelines – a challenge for natural hazard and risk managers. *Proc. Terrain and Geohazard Challenges Facing Onshore Pipelines*, Thomas Telford, London, 2004
- PRECISE ORBIT EPHEMERIDES. Available online:
https://qc.sentinel1.eo.esa.int/aux_poeorb (accessed on 8 January 2019).
- PRICE, E.J.; SANDWELL, D.T. (1998) Small-scale deformations associated with the 1992 Landers, California, earthquake mapped by synthetic aperture radar interferometry phase gradients. *J. Geophys. Res.* 103:27001–27016.

REGIONE LIGURIA, Interferometria Differenziale Multitemporale Radar Satellitare. Available online: <http://www.cartografiarl.regione.liguria.it/RiskNat/Fruizione.asp> (accessed on 21 February 2019).

RIEDEL, B.; WALTHER, A. (2008) InSAR processing for the recognition of landslides. *Advances in Geosciences*, 14, 189-194.

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. I.E.E.E.* 88 (3). 333-382.

ROSEN, P.A.; HENSLEY, S.; PELTZER, G.; SIMONS, M. (2004) Updated repeat orbit interferometry package released, *Eos Trans. AGU*, 85 (5), 47– 47

ROSEN, P.A.; GURROLA, E.; SACCO, G.F.; ZEBKER, H. (2012) The InSAR scientific computing environment, in *Synthetic Aperture Radar, 2012. EUSAR. 9th European Conference on*, pp. 730–733, VDE, 2012. 1

SACCHINI, A.; FERRARIS, F.; FACCINI, F.; FIRPO, M. (2012) Environmental climatic maps of Liguria (Italy). *J. Maps* 2012, 8, 199–207.

SAMUEL W.; MCCANDLESS, J.; JACKSON, C.R. (2004) Chapter 1. Principles of Synthetic Aperture Radar. Book: *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*, Christopher R. Jackson and Jhon R. Apel Editors.

SAVIGNY, K.W.; PORTER, M.; ESFORD, F.; DUNLOP, C.; REED, M.T. (2004) Management of geohazards in the interests of owners and operators of onshore pipelines. *Proc. Terrain and Geohazard Challenges Facing Onshore Pipelines*, Thomas Telford, London, 2004.

SAVIGNY, K.W.; PORTER, M.; LEIR, M. (2005) Geohazard risk management for the onshore pipeline industry. *Business Briefing: Exploration and Production: The Oil and Gas Review*, 2, 1-3.

SILLERICO, E.; EZQUERRO, P.; MARCHAMALO, M.; HERRERA, G.; DURO, J.; MARTÍNEZ, R. (2015) Monitoring ground subsidence in urban environments: M-30 tunnels under Madrid City (Spain). *Ing. Investig.* 2015, 35, 30–35.

SINGHROY, V.; COUTURE, R.; ALASSET, P.J.; PONCOS, V. (2004) InSAR monitoring of landslides on permafrost terrain in Canada. *Proceedings of the 2007 IGARSS, 23-28 July 2007, Barcelona Spain*, 2451-2454.

SKOLNIK, M. (2008) *Radar Handbook*. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2008.

- STROZZI, T.; DELALOYE, R.; POFFET, D.; HANSMANN, J.; LOEW, S. (2011) Surface subsidence and uplift above a headrace tunnel in metamorphic basement rocks of the Swiss Alps as detected by satellite SAR interferometry. *Remote Sens. Environ.* 2011, 115, 1353–1360.
- STROZZI, T.; CADUFF, R.; WEGMÜLLER, U.; RAETZO, H.; HAUSER, M. (2017) Widespread surface subsidence measured with satellite SAR interferometry in the Swiss alpine range associated with the construction of the Gotthard Base Tunnel. *Remote Sens. Environ.* 2017, 190, 1–12.
- SWEENEY, M.; GASCA, A.H.; GARCIA-LOPEZ, M.; PALMER, A.C. (2005) Pipelines and landslides in rugged terrain: a database, historic risks and pipeline vulnerability. In Sweeney, M., ed., *Terrain and geohazard challenges facing onshore oil and gas pipelines*, 641-660. Thomas Telford.
- SWEENEY, M. (2005) *Terrain and geohazard challenges facing onshore oil and gas pipelines*. Thomas Telford, 758 pp., London.
- TOUGH, R.J.A.; BLACKNELL, D.; QUEGAN, S. (1995) A statistical description of polarimetric and interferometric synthetic aperture radar data. *Proc. Math. Phys. Sci.* 449 (1937), 567–589.
- VILLANI, F, CIVICO, R, PUCCI, S ET AL. (2018) A database of the coseismic effects following the 30 October 2016 Norcia earthquake in Central Italy. *Scientific Data*, 5. 180049. ISSN 2052-4463
- WANG, T.; PERISSIN, D.; MINGSHENG, L.; ROCCA, F. (2008) Deformation Monitoring by Long Term D-InSAR Analysis in Three Gorges Area, China. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, IGARSS 2008*, July 8-11, 2008, Boston, Massachusetts, USA, Proceedings.
- WERNER, C.; WEGMULLER, U.; STROZZI, T.; WIESMANN, A. (2000) Gamma SAR and interferometric processing software, paper presented at ERS-ENVISAT Symposium, Eur. Space Agency, Gothenburg, Sweden.
- YOUNG, A.; LOCKEY, A. (2013) The assessment of pipeline integrity in geohazard areas using ILI data. *Proceedings of the ASME 2013 International Pipeline Geotechnical Conference, IPG2013-1971*.

- YU, C.; PENNA, N.T.; LI, Z. (2017) Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 2008–2025.
- YU, C.; LI, Z.; PENNA, N. T.; CRIPPA, P. (2018) Generic atmospheric correction model for Interferometric Synthetic Aperture Radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123.
- YU, C.; LI, Z.; PENNA, N.T. (2018) Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model, *Remote Sens. Environ.*
- YUNJUN, Z.; FATTAHI, H.; AMELUNG, F.; (2019) Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction, *Computers & Geosciences*.
- ZANGERL, C.; EBERHARDT, E.; EVANS, K.; LOEW, S. (2008) Consolidation settlements above deep tunnels in fractured crystalline rock: Part 2—Numerical analysis of the Gotthard highway tunnel case study. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2008, 45, 1211–1215.
- ZANGERL, C.; EVANS, K.; EBERHARDT, E.; LOEW, S. (2018) Consolidation settlements above deep tunnels in fractured crystalline rock: Part 1—Investigations above the Gotthard highway tunnel. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2018, 45, 1195–1210.
- ZEBKER, H.A.; VILLASENOR, J. (1992) Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1992, 30, 950–959.
- ZHOU, X.; CHANG, N.B.; LI, S. (2009) Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research. *Sensors*, 9, 1876-1912.