

UNIVERSITÉ PARIS-EST

École doctorale "Information, Communication, Simulation, Modélisation"

UNIVERSITA DELLA CALABRIA

Facoltà S.M.F.N. - Dipartimento di Scienze della Terra

Tesi di Dottorato

Formazione dottorale : Scienze dell'Informazione Geografica

presentata da

Gerardo FORTUNATO

PROCEDURE SINOTTICHE DI CALIBRAZIONE DI ANALISI CONDOTTE
MEDIANTE INTERFEROMETRIA RADAR SATELLITARE SU RETI DI
INFRASTRUTTURE URBANE E STRADALI

Sostenuta il 04/02/2009

davanti al commissione composta da:

Benoît DEFFONTAINES

Direttore di tesi, Università di Paris EST - Francia

Fabrizio FERRUCCI

Co-Direttore di tesi, Università della Calabre - Italia

Franco COREN

Relatore, Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - Italie

Giuseppe DI MASSA

Relatore, Università della Calabria – Italia

Jacques ANGELIER

Relatore, Observatoire Océanologique Géosciences Azur - Francia

Franco RUSSO

Correlatore, Università della Calabria - Italia

Alain ARNAUD

Correlatore, Altamira-Information Company – Spagna

Résumé

L'étude ci-dessous illustre les résultats d'une activité expérimentale basée sur des couples d'images ERS et ENVISAT, déroulée dans l'Italie du Sud et en particulier en Calabre centre-méridionale pour la période 1998-2000 (ERS) et jusqu'à 2005 (ENVISAT). En particulier, les techniques d'interférométrie SAR différentielles se sont montrées comme un outil important pour différentes applications et pour la détection de phénomènes distinct. Les données dérivées constituent un élément important pour supporter l'analyse et intégrer les connaissances d'un territoire comme celui de la Calabre Central qui, paradoxalement encore aujourd'hui, n'a été pas objet d'études géologiques détaillées suffisamment fines bien que les chroniques reportent plusieurs faits majeurs d'« *instabilité gravitaire* ».

L'objectif principal du travail a été la détection de subsidences, de glissements de terrain et l'évaluation générale des conditions du risque pour une zone régionale stratégiquement très important tel que la « Piana di Lamezia » à travers l'utilisation de données dérivées de l'analyse interférométrique SAR et leur intégration dans un SIG. Puis, on a voulu vérifier si la production de « *données accessoires* », toujours dérivées du processing SAR (cartographie ILU), sont exploitables et utiles à intégrer, en l'améliorant, la cartographie thématique et la bibliographie géologique-technique existantes.

Après avoir présenté synthétiquement les principes des techniques utilisées et l'illustration de certaines approches originales dans leur implémentation pour la réduction des problèmes générales de bruit, on a montrés les résultats de leur application pour des thématismes. En particulier nous avons focalisé l'attention sur les zones urbaines et l'environnements des villes de *Vibo Valentia* et *Lamezia Terme* et sur le réseau des infrastructures présentes (ligne ferroviaire *Tirrena Inferiore*, autoroute A3 *Salerno-Reggio Calabria* et aéroport *Sant'Eufemia* de *Lamezia Terme*). Les exemples choisis constituent le prototype des petites villes caractéristiques de l'Italie méridionale avec des agglomérations urbaines modestes situées dans des zones qui parfois encore restent rurales et surtout avec des passages nets à des terrains à haut taux de couverture végétale. Les deux villes, toutefois, maintiennent des particularités étant *Lamezia Terme* placé dans un graben tectonique où il y a des évidences d'une tectonique active avec subsidence généralisée et *Vibo Valentia* sur un horst où le soulèvement néotectonique régional montre une accélération des processus de démantèlement des versants.

Enfin, ce travail montre que l'interférométrie radar différentielle est un outil opérationnel pour l'étude des déformations actives dans ce territoire. Si le travail a porté sur la standardisation d'une procédure opérationnelle avec l'intégration d'un logiciel expérimental, les apports de la technique concernent à la fois la localisation, la caractérisation et la quantification des phénomènes affectant la surface topographique. L'ensemble des informations obtenues fournit des indications inédites et précieuses pour la compréhension de certains phénomènes et leur modélisation. L'analyse qualitative et semi-quantitative des zones relatives à l'aéroport Sant'Eufemia de Lamezia Terme et à la zone urbaine de Vibo Valentia pose de nouvelles questions par rapport au déclenchement de phénomènes d'instabilités géologiques par exemple pendant des phénomènes sismiques et donc aussi par rapport à la gestion de situation de risque par la protection civile. Pour ce qui concerne l'apport direct de la technique de l'interférométrie SAR différentielle au contrôle des infrastructures, elle semble résulter actuellement adaptée que pour un leur étude indirecte. En effet, l'utilisation d'images dérivées par les satellites européens ERS et ENVISAT, ne permet pas de résoudre par exemple les problématiques liées par exemple à l'extension des cibles. Actuellement, n'étant pas complètement opérationnels les nouveaux satellites SAR caractérisés par une résolution métrique et/ou sub-métrique, une analyse plus fine ne serait possible qu'avec l'utilisation de la technique des Permanent Scatterers qu'il faudrait développer maintenant ici.

Indice

Introduzione.....	6
Capitolo 1 Principi SAR	15
1.1 Il sistema.....	15
1.2 Geometria di acquisizione	16
1.3 Risoluzione del sistema SAR	19
1.3.1 Range resolution (across track resolution).....	19
1.3.2 Azimuth resolution (along track resolution).....	21
1.4 Il Signal Processing	27
1.4.1 Il matched filter.....	27
1.4.2 Registrazione del segnale riflesso.....	28
1.4.3 Proprietà del chirp pulse: la Range Compression	29
1.4.4 Strip mapping e azimuth compression.....	32
1.4.5 Focalizzazione.....	34
1.5 Parametri SAR.....	37
1.5.1 Backscattering.....	38
1.5.2 Costante dielettrica complessa.....	39
1.5.3 Deformazioni geometriche.....	39
1.5.4 Effetto speckle	43
1.6 Conclusioni.....	44
Capitolo 2 Interferometria SAR	45
2.1 La fase interferometrica.....	45
2.2 Prodotti base derivate dal processing SAR.....	48
2.2.1 Immagini d'intensità.....	48
2.2.2 Mappe di coerenza	49
2.2.3 Interferogrammi	51
2.3 Fonti di errore nelle osservazioni degli spostamenti	55
2.3.1 Noise e decorrelazione della fase.....	55
2.3.2 Errori orbitali	58
2.3.3 Errori del Modello Digitale del Terreno	59
2.3.4 Errori derivati dal contributo atmosferico.....	60

2.3.5	Proiezione dello spostamento	63
2.4	Conclusioni.....	64
Capitolo 3.	Aree di studio selezionate. Caratteristiche, dissesti, dati SAR disponibili.....	66
3.1	Scelta della zona di studio.....	66
3.2	Caratteristiche geologiche e geomorfologiche generali.....	68
3.2.1	L’hinterland del lametino.....	71
3.2.2	Il territorio del “ vibonese ”	78
3.3	Le deformazioni catalogate.....	85
3.4	I fattori limitanti l’osservazione interferometrica in Calabria e nel territorio di studio.....	92
3.5	Selezione delle immagini SAR satellitari.....	96
3.5.1	Fattori condizionanti.....	96
3.5.2	Immagini selezionate.....	97
3.6	Conclusioni.....	100
Capitolo 4	Processing DInSAR.....	101
4.1	Scelta del metodo	101
4.2	Descrizione del software utilizzato	102
4.2.1	Prodotti DInSAR	102
4.2.2	Algoritmo di separazione delle differenti componenti della fase interferometrica..	105
4.2.3	Il software SHISSOR.....	115
4.2.4	Prodotti di classificazione tipo ILU (Interferometric Land Use).....	117
4.4	Conclusioni.....	120
Capitolo 5.	Prodotti derivati dal “processing” DInSAR	121
5.1	Specifiche del processing effettuato.....	121
5.2	Mappe di Deformazione del Suolo (slant range).....	124
5.3	Prodotti accessori	137
5.3.1	DSM (Digital Surface Model)	137
5.3.2	Cartografia ILU (Interferometric Land Use)	146
5.4	Conclusioni.....	152
Capitolo 6.	Integrazione dei dati SAR in ambiente GIS.....	153
6.1	Trattamento dei dati interferometrici satellitari.....	153
6.2	Banca dati.....	158
6.3	Analisi dei dati interferometrici	161

6.3.1 Approccio qualitativo.....	161
6.3.2 Approccio semi-quantitativo.....	166
6.4 Modelli di deformazione e scenari di rischio per l'area dell'aeroporto di Sant'Eufemia.	177
6.5 Modelli di deformazione e scenari di rischio per la città e l'hinterland di Vibo Valentia	183
Capitolo 7. Conclusioni	189
7.1 Conclusioni metodologiche	190
7.2 Conclusioni tematiche	192
7.3 Sviluppi futuri.....	194
Lista delle Figure e delle Tabelle	208
Allegato I - Radiazione e spettro elettromagnetico.	213
Allegato II - RADAR e micro-onde	214
Allegato III - Radar VS Ottico	216
Allegato IV - Lista delle missioni SAR satellitari	217
Allegato V - Proposta Cat1 accettata da ESA.....	218
Allegato VI - Lista immagini SAR utilizzate.	225

Introduzione

Generalità e interesse dello studio

Le condizioni geologiche, sismiche, climatiche ed antropiche rappresentano, per molte regioni italiane, gli elementi di base del rischio sismico e idrogeologico. In particolare, per la Calabria, queste assumono un carattere di considerevole preminenza, costituendo, per certi versi, motivi penalizzanti lo sviluppo socio-economico. Talvolta, tali eventi hanno indotto anche l'intollerabile perdita di vite umane. A riguardo basta ricordare le migliaia di vittime dei diversi terremoti che hanno interessato la regione (Figura 1): 1908 terremoto di Messina-Reggio Calabria (130.000 morti); 1783 sisma Calabria centro-meridionale (30-40.000 morti). Oggi, in occasione di avvenimenti meteorologici e sismici di una certa intensità, si assiste puntualmente alla rimobilizzazione di antiche frane e/o a movimenti di primo distacco (*first time landslides*), che provocano ancora vittime e molti senza tetto, danni alle reti di comunicazione, alle strutture produttive e ai servizi a rete. Cause di disastri sono anche le ricorrenti inondazioni che si ripropongono ogni 10-15 anni e che partecipano in modo non secondario a innescare movimenti di massa ed a far crescere i costi sociali ed economici indotti dai fenomeni naturali.

Sulla diffusione e la dimensione del rischio idrogeologico, i Servizi Tecnici della Presidenza del Consiglio dei Ministri hanno registrato 5.400 inondazioni e 11.000 frane, negli ultimi 80 anni. Oltre alla grave ed intollerabile perdita di vite umane, i danni, negli ultimi 20 anni ammontano a 15 miliardi di euro. Nell'archivio AVI del CNR-GNCI (Gruppo Nazionale Catastrofi Idrogeologiche), nello stesso arco temporale, sono catalogati 658 avvenimenti franosi e 496 alluvioni relative a 230 località (Pileggi, 2000). La Calabria risulta aver contribuito in modo considerevole a queste cifre.

Nella regione calabrese il dissesto idrogeologico è indotto da fenomeni molto eterogenei. Perciò, un loro adeguato inquadramento deve avere una caratterizzazione fortemente interdisciplinare. La comprensione del "motore geologico" dei fenomeni di dissesto assume un ruolo d'importanza fondamentale.

Alla luce delle considerazioni appena esposte, l'argomento centrale del presente lavoro ha riguardato l'applicazione delle relativamente recenti tecniche di teledetezione radar satellitare e l'analisi del loro apporto, all'identificazione di aree in deformazione ed alla prevenzione del rischio in una regione come la Calabria con singolarità legate alla forte eterogeneità topografica ed all'alto tasso di copertura vegetale. L'obiettivo è stato focalizzato sull'identificazione e la misura delle deformazioni del suolo in ambito urbano e dei fenomeni d'instabilità che concernono più direttamente le reti infrastrutturali. Lo studio si è basato su dati radar ad apertura sintetica (SAR) derivati dai satelliti ERS1/2 e ENVISAT. Questi sono stati essenzialmente elaborati con la tecnica dell'Interferometria Radar Differenziale (DInSAR) seppur il loro processamento abbia previsto approcci originali.

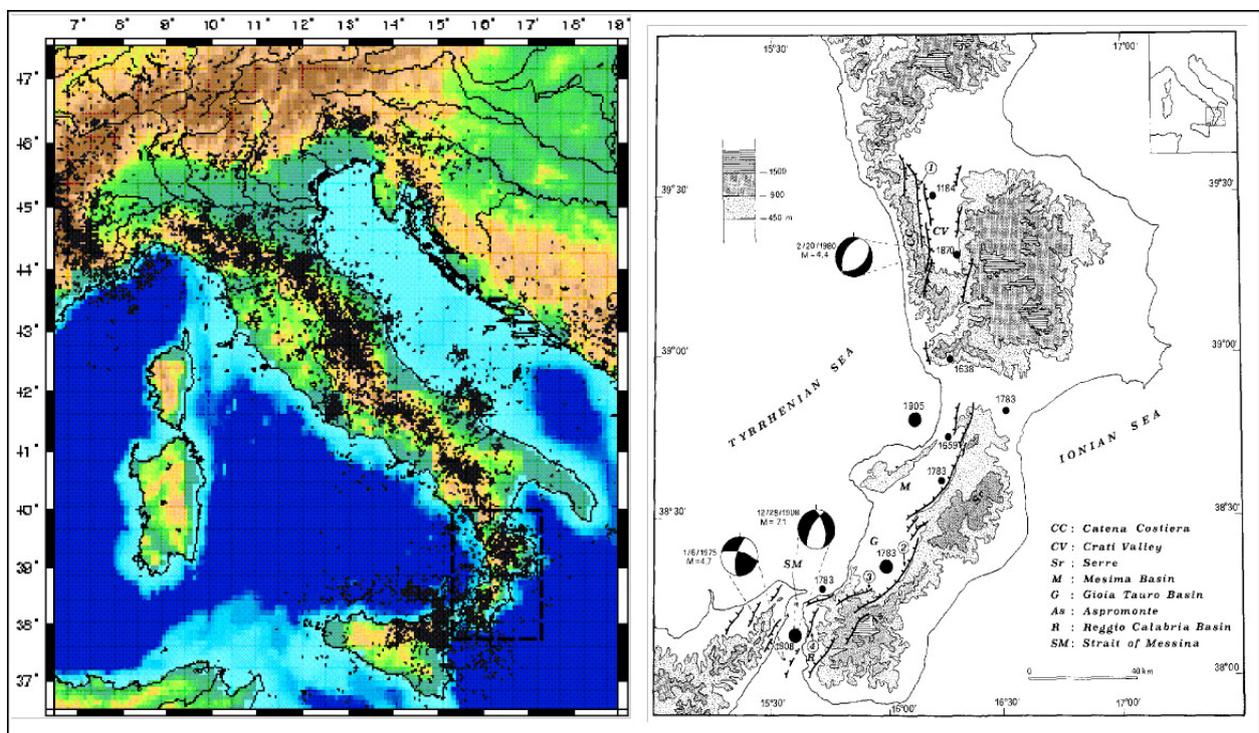


Figura 1. Situazione della Calabria nella penisola italiana.

- **A sinistra:** i punti in nero rappresentano i terremoti superficiali più recenti. La concentrazione dei punti mostra chiaramente come la regione è interessata da una sismicità molto spinta. - **A destra:** carte sismo-tettonica dell'Arco Calabro. Le faglie del quaternario sono principalmente normali. I punti datati indicano la localizzazione dei principali sismi che si sono prodotti nella regione a partire dal 1000 d.C. (Tortorici et al., 1995).

Sviluppata operativamente negli ultimi 15 anni, DInSAR è una tecnica utilizzata per misurare la deformazione della superficie terrestre. Le sue applicazioni, in particolare la capacità di misurare movimenti millimetrici degli obiettivi, la rendono una tecnica molto utile al controllo del territorio. Tale capacità è ampiamente documentata nella letteratura scientifica con differenti

pubblicazioni su campi deformativi legati ad attività vulcaniche, estrattive, sismiche, franose, etc (Hanssen, 2001). Tuttavia, questa “rivoluzione” nella misura delle piccole variazioni della superficie topografica spesso è rimasta unicamente utilizzata in ricerca fondamentale e/o in generale quando le condizioni al contorno si sono presentate più adatte. Esistono numerosi altri casi di applicazioni potenziali che bisogna ancora validare in situazioni meno favorevoli: obiettivi con espansione spaziale modesta (piccole deformazioni in ambito urbano) e/o con caratteristiche particolari (strade e autostrade, rilevati ferroviari, etc...), isolati, su pendii o relativi ad immagini con forte presenza di *noise*.

Nel caso specifico della Calabria, la sola identificazione dei fenomeni d’instabilità o di deformazione potrebbe non risultare di grande importanza vista la buona conoscenza della loro localizzazione. Al contrario, il controllo del “*tasso di spostamento*” così come “*l’identificazione dei cambiamenti post-evento*”, suscitano largo interesse. Il controllo del tasso di spostamento risulta dunque essere uno dei prodotti più interessanti e ricercati del “*processing interferometrico*”.

Lo scrittore “Guido Piovene” annotava: “*la Calabria sembra essere stata creata da un DIO capriccioso che, dopo aver creato differenti mondi, si è divertito a mescolarli insieme*”, (Piovene, 1957). Questa notazione di fantasia trova conferma nelle reali condizioni del territorio con eterogeneità delle formazioni geologiche, morfologia molto varia, paesaggi molteplici. Da ciò è derivato anche il confronto di differenti “*scuole di geologia*” che, ancora oggi, non hanno prodotto idee completamente convergenti sulla costituzione dello stato attuale del territorio regionale calabrese, (Figura 2).

Se i dati relativi alla storia geologica di un territorio costituiscono un elemento base ed indispensabile per la comprensione integrale della sua evoluzione, indicazioni altrettanto importanti possono essere dedotte dallo studio delle deformazioni attuali della superficie terrestre. Attraverso lo studio delle deformazioni di superficie possono essere derivate importanti informazioni indirette. Infatti, per esempio, questi possono fornire informazioni, sulla tettonica che interessa la parte più superficiale della crosta terrestre. La prossimità alla superficie rende fondamentale la loro comprensione vista l’influenza più diretta che esercitano sull’uomo e le sue attività. L’interferometria radar differenziale permette di misurare un’ampia parte delle

deformazioni della superficie indotte sia da forza tettoniche che gravitative: tipicamente, in condizioni ottimali, deformazioni millimetriche, su superfici estese fino a 400x400 Km, sulla quasi totalità delle superfici emerse. Generalmente, l'informazione è fornita sotto forma di immagini con una risoluzione spaziale metrica e con ripetitività variabile dal giorno al mese.

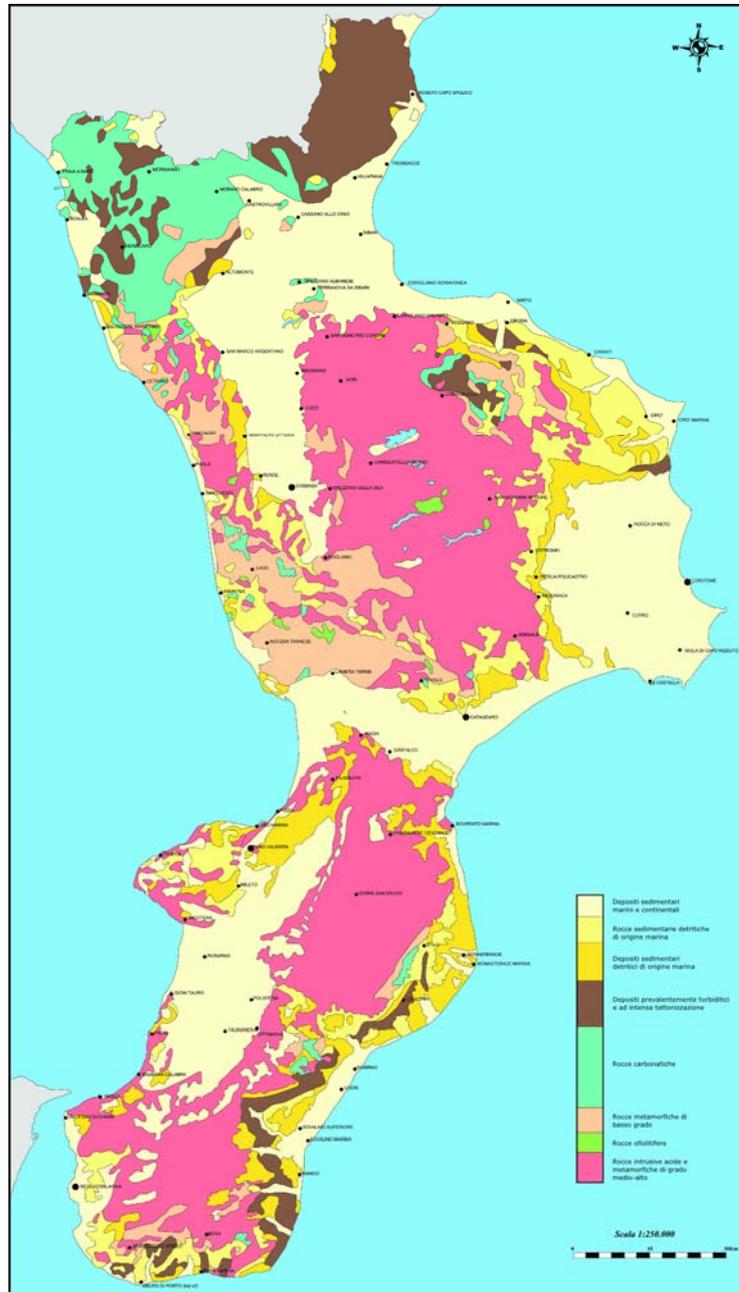


Figura 2. Carta Litologica della Calabria Scala 1:250000.

Base geologica: “Carte Geologica d’Italia” (1:500.000), base strutturale: “Carta delle Grandi Frane e Deformazioni Gravitative Profonde di Versante della Calabria (1:250.000). Realizzata dal Centro Cartografico Regionale.

Dunque, essa permette di osservare uno spettro spazio-temporale delle deformazioni che occupa un posto originale rispetto agli altri metodi esistenti (GPS, sismicità, geodesia terrestre, fotogrammetria, correlazione d'immagini, etc.).

La maggior parte del territorio calabrese è caratterizzato da variazioni topografiche repentine e importanti e risulta ricoperto da una vegetazione densa. Questi sono fattori limitanti per l'applicazione delle tecniche interferometriche. Tuttavia, la presenza di zone a forte recente urbanizzazione e soprattutto l'altissima frequenza dei fenomeni di dissesto idrogeologico ne fanno un obiettivo interessante. In questo quadro, l'interesse del lavoro ha riguardato innanzitutto l'analisi delle capacità dell'interferometria radar differenziale nella misura di deformazioni di superficie nel contesto regionale calabrese. Inoltre se i dati da essa derivati possono costituire un apporto d'informazione utile relativamente alla sicurezza urbana, infrastrutturale e in termini di protezione civile. Al tempo stesso, attraverso l'uso di “*dati accessori*” prodotti con tecniche interferometriche di classificazione qualitativa si è cercato di derivare ulteriori informazioni di supporto agli studi geologici più classici. L'originalità del lavoro è stata ricercata nell'applicazione della tecnica a casi limite non ancora esaustivamente ben rappresentati nella letteratura e su cui validare un originale software di processing sviluppato per limitare le perturbazioni atmosferiche che spesso affliggono le misure interferometriche. Fino ad oggi, sul territorio regionale questo tipo di analisi non è stata mai effettuata.

La scelta di questo tipo di ricerca è stato anche indotto dall'interesse verso i dati derivati dall'analisi condotta da diversi enti o istituzioni che direttamente o indirettamente operano sul territorio. In effetti, oggi, gli utilizzatori interessati ai risultati quantitativi dell'analisi SAR interferometrica risultano essere diversi ed in particolare amministrazioni pubbliche (corpi di protezione civile, amministrazioni locali, etc.) e strutture private (compagnie di assicurazioni, immobiliari, imprese di manutenzione, etc.).

Focalizzazione dell'argomento e obiettivi

Lo studio è stato principalmente focalizzato su due ambiti operativi: la valutazione del possibile effettivo utilizzo dello strumento di teledetezione radar satellitare in condizioni di

particolare operatività; la caratterizzazione delle situazioni di rischio individuate nella zona di studio attraverso l'integrazione dei dati ottenuti in un GIS.

Più in particolare per quello che concerne il primo aspetto a) valutare l'apporto in termini di informazioni sfruttabili che la tecnica può fornire in condizioni non ottimali e b) validare uno strumento di processamento sviluppato per limitare le perturbazioni dovute all'atmosfera che deteriorano i risultati delle misure interferometriche.

Per il secondo aspetto determinare, se le informazioni ottenute, integrate in un GIS, possono costituire la base di partenza per una caratterizzazione del rischio nelle aree investigate e approntare un modello di interpretazione geologica. Soprattutto considerare l'apporto di informazioni inedite ed utili alla comprensione di problematiche fino ad oggi ignorate.

Anche se la ricerca è stata concentrata principalmente sull'individuazione e misura degli spostamenti di superficie, tuttavia, l'interferometria radar satellitare, permette di avere accesso anche ad altri tipi di informazione (per esempio, sulla natura degli oggetti e/o sull'atmosfera). Questo è stato affrontato nel corso della ricerca solo con lo scopo di migliorare l'informazione. Infatti, il territorio di studio è deficiente di bibliografia e cartografia tematica geologico-geotecnica adeguata e necessaria ad una preliminare caratterizzazione del territorio. Questa constatazione è derivata dalle ricerche effettuate nelle biblioteche dei dipartimenti universitari e del CNR che ha messo in evidenza l'insufficienza del materiale necessario ad approntare uno studio scientifico dell'area. Dunque si è voluto verificare se la produzione dei dati accessori derivati dall'analisi radar risultasse utile a colmare anche questa carenza. Si sono quindi prodotte carte tematiche della zona di studio derivate da tecniche interferometriche di classificazione: combinazione RGB, multidifference, tecniche di classificazione ILU (Interferometric Land Use).

L'interferometria radar differenziale utilizza due immagini radar di una stessa zona, acquisite in condizioni simili ma in date differenti. L'ottenimento delle informazioni sullo spostamento si fonda sull'esistenza di differenze misurabili tra le due immagini, generate da spostamenti della superficie terrestre avvenute tra le due acquisizioni. Le immagini radar utilizzate sono ottenute a partire da un radar ad apertura sintetica (SAR: Synthetic Aperture Radar), che permette di migliorare le capacità del radar "classico" (Galati, 2004). In pratica, le immagini acquisite da satellite sono attualmente le più utilizzate in interferometria radar differenziale perché queste offrono una considerevole copertura spaziale e temporale.

In una prima fase, lo studio è stato concentrato sui seguenti scenari di applicazione della tecnica DInSAR:

1 – L'identificazione delle deformazioni del suolo in zone in cui tale fenomeno non era conosciuto a priori o solo parzialmente e dove, evidentemente, la tecnica risultava sfruttabile. In questo scenario la tecnica DInSAR è stata utilizzata come “ *mezzo di prima deteazione* ” (Crippa et al., 2004). Bisogna far notare la considerevole capacità di copertura del suolo pari generalmente a 100 x 100 Km, tipica delle immagini ERS1/2 e ENVISAT (narrow swath). L'applicazione è stata basata sull'utilizzo immediato e “ *di prima approssimazione* ” della tecnica DInSAR e dunque senza analisi particolarmente spinte;

2 – Lo studio quantitativo dei fenomeni di deformazione con analisi più approfondite delle misure DInSAR in particolare sulle zone urbane e a ridosso delle reti infrastrutturali. I risultati preliminari e qualitativi ottenuti dalla fase precedente costituiscono il punto di partenza per le successive analisi tramite DInSAR “ *fine* ” (Crippa et al., 2004).

In un secondo momento, per valutare se, dopo l'acquisizione di dati quantitativi, l'interferometria SAR poteva risultare utile anche per la produzione di cartografia tematica, l'analisi è stata ulteriormente spinta attraverso l'utilizzo di metodi di classificazione. Ciò per giustificare, anche dal punto di vista economico, l'acquisizione di un solo tipo di immagini satellitari capaci dunque di fornire differenti tipi d'informazione: quantitativa e qualitativa.

I dati raccolti hanno consentito di fare osservazioni che hanno posto questioni nuove relativamente alla valutazione del rischio nelle aree urbane di Vibo Valentia e Lamezia Terme e per l'area su cui è collocato l'Aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme.

Approccio utilizzato e articolazione del lavoro

Un approccio completo dell'argomento presentato potrebbe essere trattato in modo completamente esaustivo se tutte le “messe in opera” (implementazioni) delle tecniche d'interferometria radar fossero applicate all'intera zona di studio. Praticamente, diversi problemi operativi e il numero di immagini che sarebbe stato possibile acquisire ci ha imposto di fare delle scelte sulle zone da privilegiare, su quale tipo di satellite utilizzare, ecc. Lo studio quindi ha

voluto costituire un primo approccio all'analisi in vista di studi più completi. Lo stesso è stato sempre condotto tenendo ben presenti le conoscenze esistenti sull'area e non dimenticando di menzionare le condizioni in cui il processamento dei dati SAR è stato realizzato. *Finalmente, come accennato, si è deciso di privilegiare l'esplorazione di fenomeni di deformazione in ambiente urbano e concernenti direttamente o indirettamente le reti infrastrutturali utilizzando le immagini prodotte dai satelliti ERS1/2 e ENVISAT.* La ricerca ha seguito le seguenti fasi successive di sviluppo:

I **capitoli I e II** illustrano i principi del sistema e dell'interferometria SAR: caratteristiche, potenzialità e limiti. Nel capitolo I vengono introdotti i concetti di antenna sintetica, di generazione delle immagini dai sensori SAR e le loro caratteristiche principali. Il II è focalizzato sulla tecnica Interferometrica DinSAR, sui prodotti base generati e su come la misura "interferometrica grezza" contenga informazioni sullo spostamento. Dopo la presentazione dei prodotti che possono essere generati, si sono esposti i limiti dell'applicazione. Sono argomentati sia quelli inerenti al carattere stesso dell'informazione sullo spostamento che le restrizioni sull'accessibilità della stessa.

Nel **capitolo III**, dopo una breve presentazione delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche generali della Calabria si passa ad una descrizione più specifica delle zone di studio scelte. Successivamente, sono illustrati i tipi di deformazione catalogati nelle stesse aree e l'apporto che l'interferometria differenziale può dare al loro studio non dimenticando di sottolineare i problemi operativi esistenti. Nella parte finale sono illustrati i dati scelti per il processamento.

Il **capitolo IV** illustra le scelte adottate nella nostra "messa in opera" dell'interferometria differenziale in Calabria Centrale. In pratica la metodologia di processing adottato. Uno spazio importante è dedicato alla presentazione di un originale algoritmo di separazione delle differenti componenti della fase interferometrica e di uno strumento sperimentale basato su questo metodo che è stato utilizzato in una parte del processamento interferometrico.

Nel **capitolo V** sono presentati i prodotti derivati dalle procedure di elaborazione interferometrica e dunque gli esempi di applicazione della tecnica a partire dai dati acquisiti. Sono proposti sia i prodotti principali ricercati e cioè quelli relativi alle mappe di deformazione che quelli "accessori" ed intermedi come Modelli Digitali di Superficie e mappe di classificazione.

Il **sesto e ultimo capitolo** ha visto l'integrazione dei dati SAR in ambiente GIS per la costruzione dei potenziali scenari di rischio e mira a sintetizzare i possibili differenti apporti dell'interferometria radar differenziale ad una più corretta valutazione del rischio idrogeologico nelle specifiche aree. Infine le conclusioni fatte e le prospettive future.

Al fine di poter distinguere il contributo originale di questa tesi, in rapporto alle conoscenze esistenti e/o disponibili, i capitoli V e VI contengono un'introduzione che indica i risultati originali ottenuti. Il lettore è invitato ad una lettura dell'introduzione e delle conclusioni di questi capitoli, prima di immergersi in una loro analisi dettagliata.

Capitolo 1 Principi SAR

Di seguito sono presentati i principi su cui è basato il sistema SAR. In particolare le caratteristiche sull'acquisizione dei dati, la loro trasformazione in immagini interpretabili ed i parametri delle stesse.

1.1 Il sistema

Il principio di utilizzazione dei satelliti SAR con la tecnica interferometrica risalgono all'inizio degli anni '70 (Richman, 1971; Zisk, 1972) e le prime applicazioni terrestri alla fine degli anni '80 (Zebker e Goldstein, 1986). La prima piattaforma che ha fornito dati SAR per impiego civile è rappresentata dal satellite americano NASA SEASAT (lanciato nel 1979 e spentosi dopo solamente 78 giorni). Le possibilità d'investigazione offerte dall'elaborazione dei dati SAR sono diventate più interessanti con il lancio, nel maggio del 1991 del primo SAR europeo a bordo del satellite ERS-1 e finalmente la tecnica si afferma nel 1995 con il lancio dell'ERS-2, gemello dell'ERS-1 e operativo sulla stessa zona a distanza temporale di un giorno. Con questa disposizione (tandem) sono stati acquisiti re-iterativamente dati di tutta la superficie della terra che hanno costituito una banca di dati esclusiva per la produzione di “Modelli tridimensionali di Superficie” di vaste zone del globo. La prerogativa del SAR, in rapporto ai sistemi ottici, sono legate alla capacità di funzionare di notte ed in presenza di nuvole con enorme vantaggio per le zone della terra dove non esistono immagini ottiche sfruttabili a causa della persistente copertura nuvolosa. Le sue caratteristiche possono essere così sintetizzate :

- È un sistema di telerilevamento mobile che utilizza microonde elettromagnetiche trasmesse da un'antenna sottoforma d'impulsi molto corti a frequenza costante;
- L'antenna registra le onde che sono riflesse dagli obiettivi a terra in relazione alle caratteristiche di queste ultime;
- Gli impulsi registrati sono successivamente elaborati per produrre un'immagine digitale della superficie analizzata.

1.2 Geometria di acquisizione

Il sistema SAR funziona normalmente con una geometria di tipo side-looking, anche se esistono altri modi di acquisizione (per esempio Spotlight o ScanSAR). In generale, l'antenna del radar, montata su una piattaforma mobile (aereo o satellite) è orientata verso terra ortogonalmente alla direzione del movimento della piattaforma con un angolo compreso tra 20 e 80 gradi in rapporto alla direzione di Nadir (detta di off-nadir). Questa emette delle onde elettromagnetiche (con una lunghezza d'onda da centimetrica a decimetrica) e misura il raggio retrodiffuso delle onde riflesse dall'obiettivo a terra, (Ferretti et al., 1998), (Figura 3).

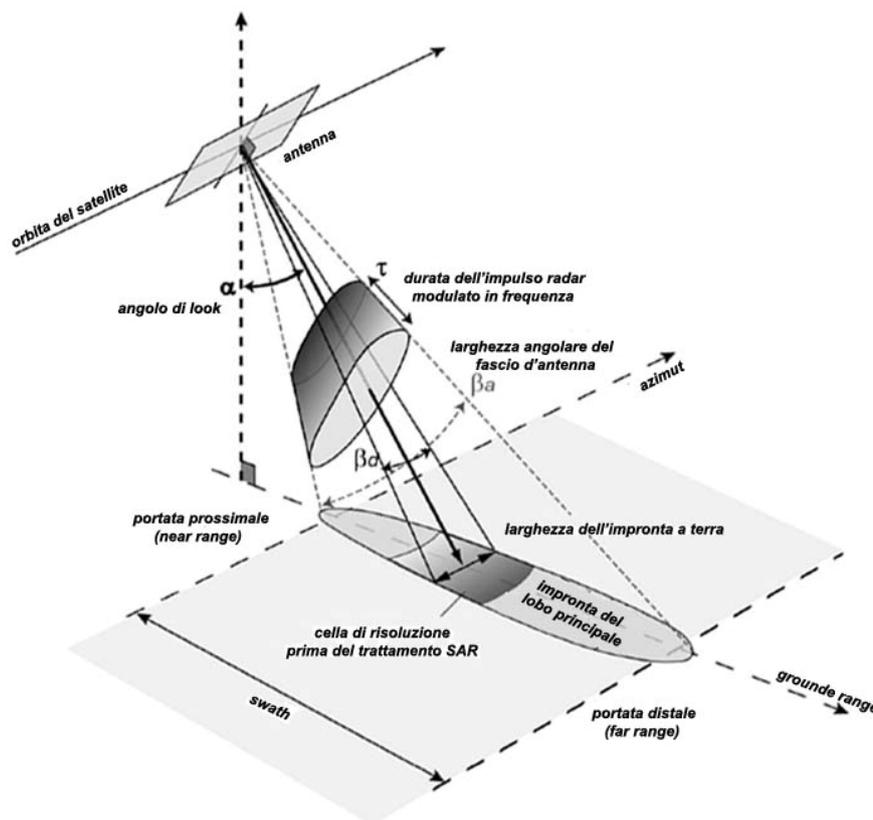


Figura 3. Geometria d'acquisizione SAR (da Pathier, 2003).

Spesso i termini “*along-track*” o “*azimut*” sono utilizzati per indicare la direzione x , “*ground range*” per la direzione y e “*slant range*” per la distanza del sensore SAR rispetto ad un bersaglio. Il radar emette regolarmente e lateralmente in rapporto al senso di spostamento del satellite, impulsi modulati in frequenza di durata τ in direzione del suolo. Le dimensioni e la forma del fascio principale emesso dipendono dalla dimensione dell'antenna. La superficie di suolo illuminata ad ogni impulsione è allungata secondo l'asse della distanza. La successione degli impulsi permette di ottenere delle informazioni su una porzione continua di suolo parallela alla direzione di azimut e di cui la larghezza (swath) è limitata dalla portata vicina e lontana del satellite.

Durante lo spostamento, illuminando l'obiettivo sulla superficie terrestre con una serie di microonde, il fascio luminoso del satellite "spazza" una porzione di suolo nella direzione del movimento. Una parte continua di suolo parallela all'orbita è "vista" dal radar e la sua larghezza è chiamata swath. La radiazione retrodiffusa, di ritorno all'antenna, è misurata dal radar. La frequenza alla quale sono emessi gli impulsi radar (PRF: Pulse Repetition Frequency) è sufficientemente grande affinché due impronte successive si ricoprano largamente. Questo ricoprimento crea una certa ridondanza d'informazione che sarà utilizzata nel processing SAR (per il satellite ERS, uno stesso punto è misurato in circa 1000 impulsi). Si devono distinguere i seguenti termini:

- Azimuth direction (along track direction) = direzione parallela al volo;
- Range direction (across track direction) = direzione perpendicolare al volo;
- Nadir = proiezione sulla superficie terrestre della posizione di volo della piattaforma SAR;
- Angolo di vista (Look angle) = angolo compreso tra la verticale della piattaforma SAR e la direzione del fascio di microonde;
- Angolo incidente (incident angle) = angolo compreso tra il raggio d'azione incidente del fascio di microonde a terra e la normale alla superficie terrestre nel punto d'incidenza;
- Angolo di depressione (depression angle) = angolo compreso tra il piano orizzontale e la direzione del fascio di microonde;
- Impronta del lobo principale (Antenne footprint) = porzione di superficie terrestre illuminata dal radar in un determinato istante;
- Radar swath = area illuminata dal radar durante l'intero periodo di acquisizione;
- Slant range = distanza tra l'obiettivo a terra e il radar;
- Ground range = distanza tra l'obiettivo a terra e il nadir;
- Near range = distanza slant range riferita ad obiettivi individuati sul margine di swath più vicino al nadir;
- Far range = distanza slant range riferita a obiettivi individuati sul margine di swath più lontano dal nadir.

Il metodo di acquisizione tipico di un sistema SAR è lo strip-map mode (Figura 4): la zona investigata viene scansionata dal RADAR lungo la direzione di volo, inviando degli impulsi a frequenza costante (corrispondente alla PRF). Per ogni impulso trasmesso, l'antenna riceve una serie di segnali riflessi corrispondenti agli obiettivi posti a distanza slant range crescente dal nadir. Il sistema registra la successione di echi in modo coerente separandoli dagli echi individuali. Ogni successione di impulsi riflessi è così messa in corrispondenza con l'impulso trasmesso che lo ha generato. Il gruppo di segnali registrati per ogni impulso inviato costituisce una linea, a cui si fa corrispondere un impulso trasmesso definito da un numero (pulse number).

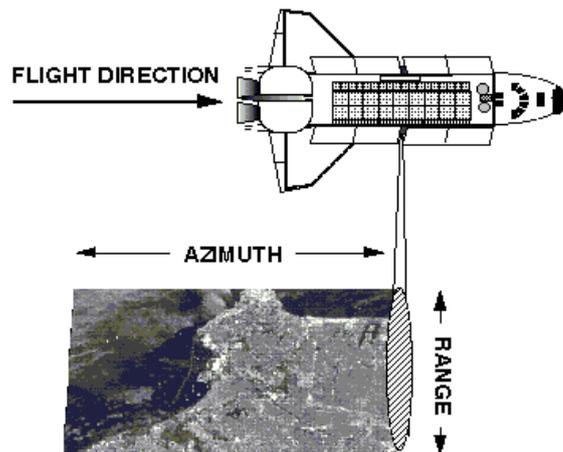


Figura 4. Acquisizione dati SAR in strip-map mode.

L'insieme di queste linee, il cui numero dipende dalla durata della registrazione e che determina la lunghezza dell'immagine, costituisce una matrice a due dimensioni, i cui dati corrispondenti sono denominati *raw*, (Figura 5). Le coordinate di un insieme di dati *raw*, e dunque di un'immagine SAR, sono lo slant range per la distanza tra l'antenna e l'obiettivo (a cui è fatto corrispondere l'echo delay time) e l'azimuth per la posizione dell'obiettivo lungo la direzione di volo. Questi dati saranno successivamente elaborati attraverso un sistema di elaborazione del segnale (signal processing), permettendo così di ottenere un'immagine dettagliata della superficie terrestre esaminata e di acquisire informazioni sulle sue proprietà fisiche: topografia, morfologia, rugosità e proprietà dielettriche (Dean, 2002).

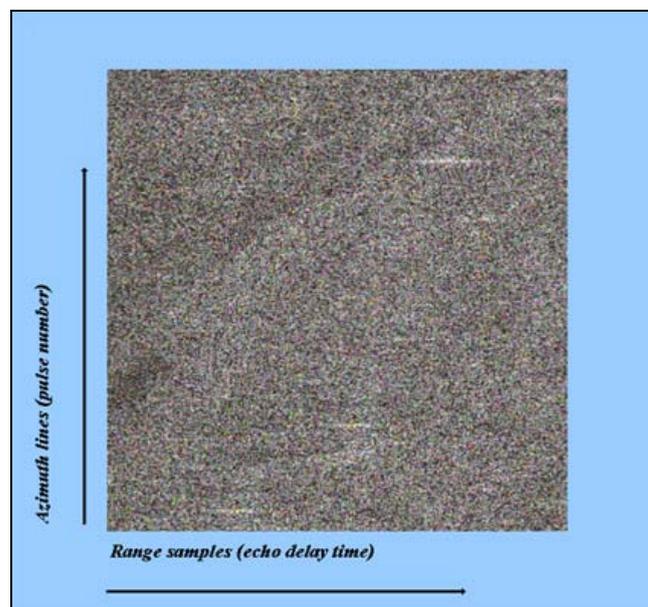


Figura 5. Esempio di insieme di dati raw (Dean, 2002).

1.3 Risoluzione del sistema SAR

La risoluzione è generalmente definita come la più piccola distanza tra due punti sulla superficie terrestre necessaria a renderli distinti sull'immagine radar. Essa risulta dalla combinazione della risoluzione laterale (*range resolution - across track resolution*) e di quella longitudinale (*azimuth resolution - along track resolution*), (Lillesand e Kiefer, 1994).

1.3.1 Range resolution (across track resolution)

Affinché un radar possa distinguere due elementi spaziali differenti in slant range, il loro impulso riflesso deve necessariamente essere ricevuto dall'antenna in tempi diversi. Si possono distinguere due casi limite:

a) Due elementi spaziali sono distinti come un unico segnale.

Un impulso di lunghezza L (determinato dalla durata della trasmissione del segnale) è trasmesso verso gli edifici A e B. Raggiunto l'edificio A, viene in parte riflesso da quest'ultimo generando un eco di ritorno. Successivamente viaggia verso B, che genera a sua volta un nuovo eco di ritorno (Figura 6).

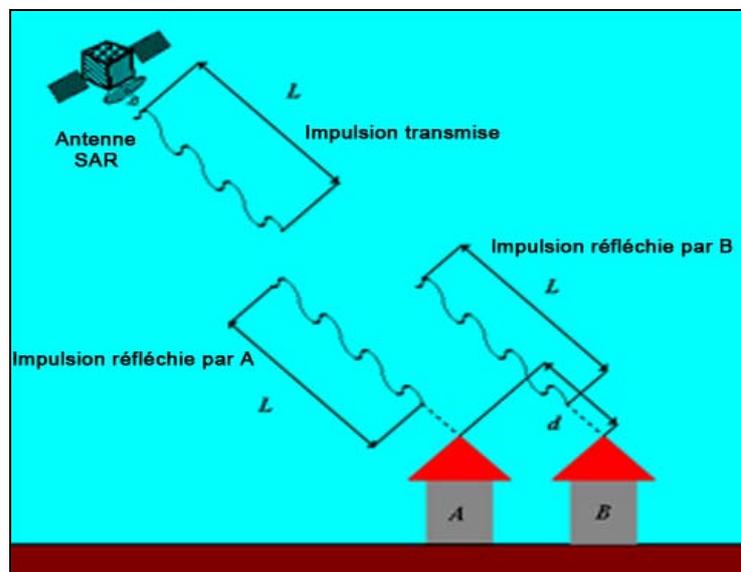


Figura 6. Due elementi spaziali sono distinti come unici.

La distanza (valutata in slant range) tra i due obiettivi ("d" in figura 6), risulta più piccola della lunghezza dell'impulso. La fine del segnale di ritorno da A, ricevuto dall'antenna ad un certo

istante, si sovrappone all'inizio del segnale di ritorno da B: i due edifici non possono essere distinti.

b) Due elementi spaziali sono distinti come differenti.

Quando i segnali raggiungono l'antenna in due istanti diversi, registrati in tempi successivi, gli echi di ritorno provenienti dagli edifici A e B, sono registrati come segnali distinti. In questo caso l'impulso riflesso da B non si sovrappone a quello riflesso da A all'istante della ricezione del segnale, (Figura 7).

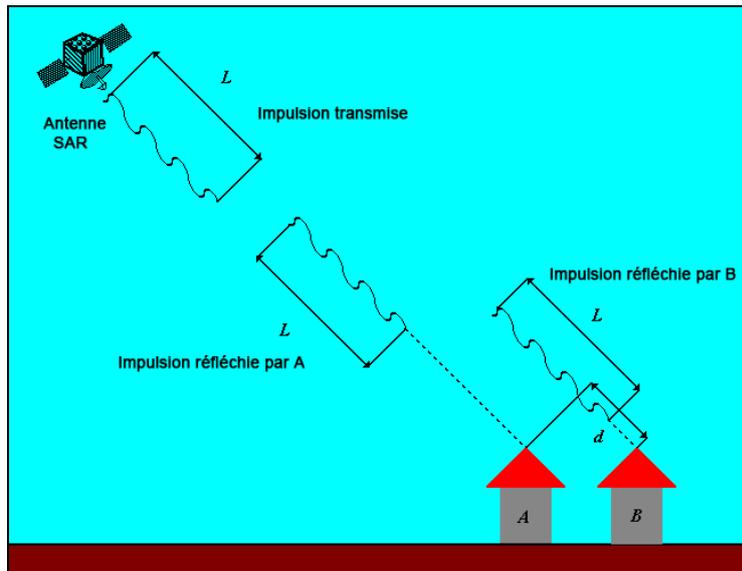


Figura 7. Due elementi spaziali sono distinti come diversi.

In generale, visto che l'impulso radar deve viaggiare in due direzioni (andata e ritorno), i due edifici inviano echi distinti se:

$$d > \frac{L}{2} \tag{1.1}$$

Dunque la range resolution δ_{sr} assume la forma seguente:

$$\delta_{sr} = \frac{L}{2} = \frac{c \cdot \tau}{2} = \frac{c}{2 \cdot W} \tag{1.2}$$

Essendo:

- d = distanza che separa i due bersagli (valutata in slant range);
- L = lunghezza dell'impulso;

- c = velocità della luce (velocità delle onde elettromagnetiche nello spazio vuoto);
- τ = durata dell'impulso ;
- W = banda di frequenza dell'impulso (pulse bandwidth).

Si conclude dunque che la “ range resolution ” è indipendente dalla distanza tra il bersaglio e l'antenna, essendo al contrario direttamente proporzionale alla durata dell'impulso (Lillesand e Kiefer, 1994). Per ottenere dunque una buona risoluzione in range, l'impulso radar deve essere il più breve possibile. Tuttavia esso deve mantenere energia sufficiente per permettere la produzione del segnale riflesso e quindi sarà necessario svilupparne l'ampiezza. Ottenere un impulso molto corto ad elevata energia risulta operativamente difficile. Per ovviare a questa limitazione viene utilizzato un procedimento definito “ chirp approach ”: l'impulso corto a frequenza costante è sostituito da un impulso lungo a frequenza modulata. Questo, con l'energia distribuita in un tempo più lungo, può essere nuovamente compresso dopo la registrazione della riflessione attraverso un'operazione di filtraggio (matched filtering operation), (Lillesand e Kiefer, 1994).

1.3.2 Azimuth resolution (along track resolution)

L'azimuth resolution identifica la possibilità di discriminare due oggetti sulla direzione di volo di un'immagine radar. Il fascio di microonde emesse dall'antenna illumina una determinata porzione della superficie terrestre: questa zona è denominata *antenne footprint* (Figura 8). L'ampiezza del footprint al suolo lungo l'azimuth direction “ L_{eff} “ dipende dall'apertura angolare α del fascio di microonde e può essere espressa mediante la seguente equazione:

$$L_{eff} = \alpha \cdot R = \frac{\lambda}{L} \cdot R \quad (1.3)$$

Essendo:

- λ = lunghezza d'onde dell'impulso;
- L = lunghezza dell'antenna in azimuth direction;
- R = slant range.

Questa ampiezza rappresenta la distanza percorsa dalla piattaforma SAR durante il passaggio del bersaglio nella zona illuminata dal radar. Tutti gli impulsi trasmessi (1700 al secondo per il satellite ERS-1) e successivamente riflessi dal bersaglio contribuiscono a fornire informazioni e dunque migliorare la risoluzione dell'oggetto a terra.

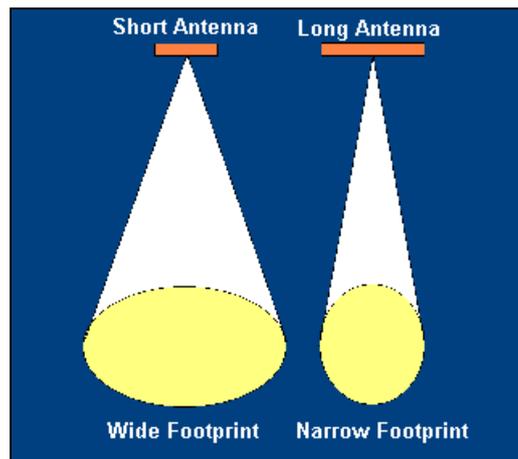


Figura 8. Antenna footprint.

Il fascio di microonde inviato dall'antenna illumina un'area denominata “ *antenna footprint* ”. Nella formazione di un'immagine radar, il segnale registrato dipende dall'energia retrodiffusa dagli obiettivi al suolo all'interno di quest'area. L'aumento della lunghezza dell'antenna è inversamente proporzionale alla larghezza dell'orma a terra.

Questi equivalgono all'emissione di un impulso individuale da un radar stazionario dotato di un'antenna molto più grande (1700 volte più grande, lunga quindi circa 4 Km se riferita al satellite ERS-1), ed alla registrazione successiva degli impulsi riflessi. Ciò risulta tuttavia operativamente di difficile realizzazione.

Queste osservazioni permettono di introdurre il concetto di SAR: Synthetic Aperture RADAR (Radar ad Apertura Sintetica).

Per un sistema RAR (Real Aperture RADAR), l'ampiezza dell'antenna footprint corrisponde all'effettiva risoluzione spaziale in azimuth direction: in un tale sistema due oggetti possono essere discriminati, in azimuth direction, solamente se la loro distanza è maggiore di questa ampiezza (Lillesand e Kiefer, 1994). Per poter ottenere elevate risoluzioni in azimuth resolution sarebbe necessario operare nelle seguenti modalità:

1. diminuire la lunghezza d'onda dell'impulso. Tuttavia lunghezze d'onda corte non possono essere utilizzate in condizioni ambientali in cui siamo presenti nuvole o altre perturbazioni atmosferiche;
2. aumentare la lunghezza dell'antenna. Questa soluzione è sia tecnicamente che economicamente svantaggiosa.

Il sistema RAR non è in ogni caso nella misura di generare buone risoluzioni ad altezze elevate e su vaste aree, vale a dire in condizioni tali da provocare un aumento della slant range. Il SAR (acronimo di Synthetic Aperture Radar) rappresenta l'evoluzione della tecnica radar classica

sviluppata nella prima metà del ventesimo secolo. Le tecniche di compressione dell'impulso e il concetto di apertura sintetica hanno permesso risoluzioni spaziali metriche con antenne fisiche relativamente piccole. Le buone risoluzioni in azimuth direction, non realizzabili da un normale sistema RAR, vengono ottenute perché la risoluzione in azimuth viene resa indipendente dallo slant range (Brown e Procello, 1969; Harger, 1970; Tomiyasu; 1978; Wehner, 1987). Il meccanismo su cui si basa è il seguente: a causa dello spostamento relativo del bersaglio rispetto alla piattaforma SAR in movimento, la superficie terrestre subisce uno shift in frequenza dovuto all'effetto Doppler (Wiley, 1985). Questo permette di distinguere differenti bersagli posti alla stessa distanza slant range in rapporto al radar. Una piattaforma SAR procede lungo la direzione di volo con una velocità V (Figura 9) trasmettendo impulsi con lunghezza d'onda λ e registrando il segnale riflesso dal bersaglio (beam sharpening), (Ulaby et al., 1982). Si consideri ora il punto C: per un osservatore solidale con la piattaforma questo sembra allontanarsi dal radar. Per effetto Doppler il segnale riflesso da tale bersaglio avrà una frequenza minore dell'impulso trasmesso (Doppler shift negativ).

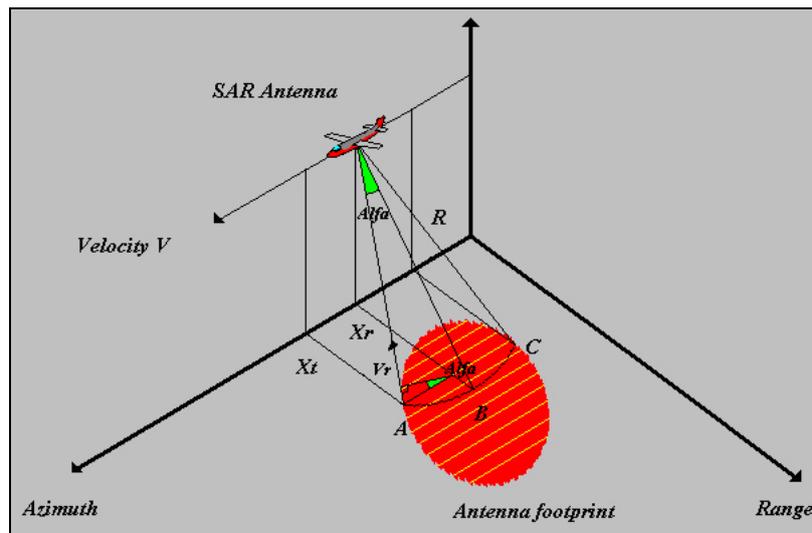


Figura 9. Meccanismo del “ doppler beam sharpening ”.

Vice-versa, un bersaglio come il punto A sembra avvicinarsi al RADAR e dunque il segnale riflesso da tale bersaglio avrà una frequenza maggiore dell'impulso trasmesso (Doppler shift positif). Quando un bersaglio (punto B) è posto in una posizione tale che la linea ideale che lo congiunge al radar è perpendicolare alla direzione di volo (broadside position), lo shift della frequenza equivale a zero (Zéro - Doppler position). Se la velocità d'avanzamento della piattaforma SAR equivale a V , il punto A si sposta in direzione opposta con velocità relativa

uguale a $-V$. La componente V_r della velocità relativa della piattaforma nel punto lungo la linea ideale che lo congiunge all'antenna SAR è dato dalla seguente equazione:

$$v_r = -V \cdot \text{sen}(\text{alfa}) = -\frac{V(x_T - x_R)}{R} = \frac{V(x_R - x_T)}{R} \quad (1.4)$$

essendo X_T e X_R rispettivamente la posizione azimuth direction del bersaglio e del radar.

La variazione nel tempo dello shift in frequenza dovuto all'effetto Doppler è denominata Doppler History (Figura 10).

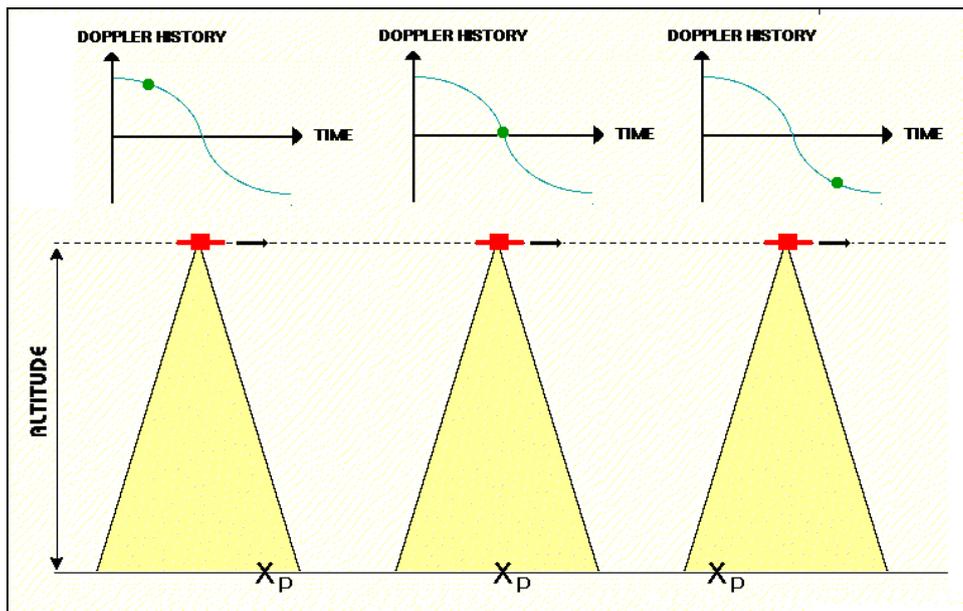


Figura 10. Doppler History: variazione nel tempo dello shift in frequenza dovuto all'effetto Doppler.

Se λ è la lunghezza d'onda dell'impulso trasmesso, a causa dell'effetto Doppler la frequenza dell'impulso riflesso dal bersaglio A differisce da quello dell'impulso trasmesso della seguente quantità:

$$f_x(x_R) = -\frac{2}{\lambda} \cdot v_r = -\frac{2 \cdot V \cdot (x_R - x_T)}{\lambda \cdot R} \quad (1.5)$$

Il fattore 2 tiene conto del percorso di andata e ritorno d'un treno di microonde. Questa variazione di frequenza Doppler (Doppler frequency) è rappresentata dalla differenza tra le frequenze emesse e quelle ricevute dal radar, causata dal movimento relativo tra la fonte dell'impulso (mobile) e il bersaglio (stazionario). Supponiamo ora di registrare tale variazione di frequenza, sempre riferita al punto A (Figura 9), nell'istante in cui questo entra nella zona

illuminata dal radar e fino a quando ne esce. Se indichiamo con ρ_{az} una generica distanza percorsa dal punto A durante il passaggio nel campo dell'antenna footprint, dall'equazione precedente si deriva:

$$B_{Df} = \frac{2 \cdot V}{\lambda \cdot R} \cdot \rho_{az} \quad (1.6)$$

essendo B_{Df} l'insieme delle frequenze Doppler registrate durante lo spostamento del punto A e costituente una banda di frequenza. La (1.6) può essere scritta come:

$$\rho_{az} = \frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot V} \cdot B_{Df} \quad (1.7)$$

che rappresenta la risoluzione realizzabile dal sistema in azimuth direction, direttamente proporzionale all'ampiezza della banda di frequenza B_{Df} . Il tempo totale della permanenza del punto A all'interno dell'antenna footprint T_a è pari a:

$$T_a = \frac{\lambda \cdot R}{L \cdot V} \quad (1.8)$$

essendo L la lunghezza dell'antenna in azimuth direction, il più piccolo valore di ampiezza per la banda di frequenza B_{Df} equivale a:

$$B_{Df} = \frac{1}{T_a} = \frac{L \cdot V}{\lambda \cdot R} \quad (1.9)$$

In conclusione, l'azimuth resolution può avere la forma seguente:

$$\rho_{az} = \frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot V} \cdot \frac{L \cdot V}{\lambda \cdot R} = \frac{L}{2} \quad (1.10)$$

Si ottiene così il particolare risultato che l'azimuth resolution non è solo indipendente dalla lunghezza d'onda dell'impulso trasmesso e dalla distanza slant range tra la piattaforma SAR e il target, ma è direttamente proporzionale alla lunghezza in azimuth dell'antenna (Skolnik, 1990). In questo modo è possibile ottenere alte risoluzioni in azimuth anche con l'utilizzo di antenne di piccole dimensioni (Figura 11).

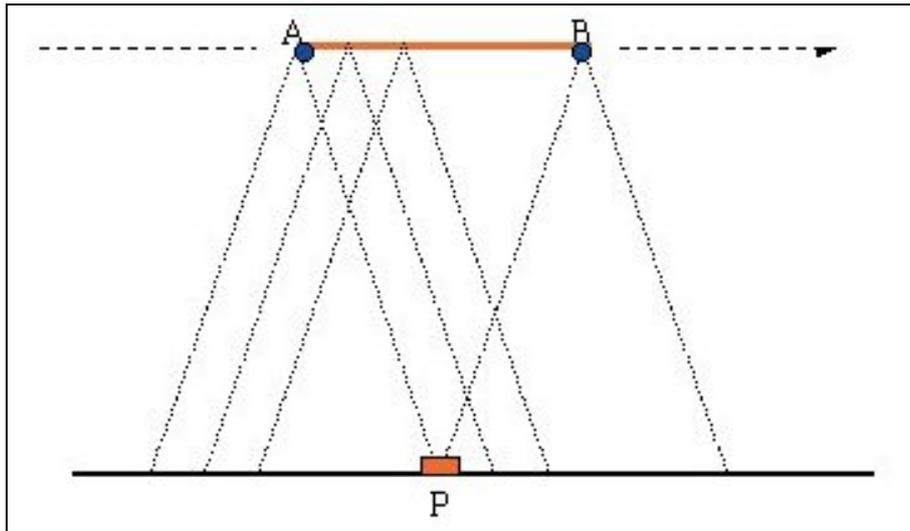


Figura 11. Concetto di Apertura Sintetica.

Il satellite spostandosi lungo l'orbita tra A e B (punto dell'orbita dove il bersaglio P è intercettato dal segnale radar rispettivamente per la prima e l'ultima volta) invia e riceve differenti segnali radar in sequenza che, combinati, simulano l'effetto di un'antenna più grande. La distanza A-B è denominata “ Apertura Sintetica ”.

1.4 Il Signal Processing

In questo paragrafo sono presentati brevemente i metodi di elaborazione dei dati RAW che portano alla generazione di un'immagine radar. Questa esprime le caratteristiche di riflettività della superficie illuminata a cui fa riferimento. Quando un impulso colpisce un bersaglio a terra, si riflette in modo divergente secondo le caratteristiche morfologiche e le proprietà dielettriche del bersaglio stesso (radar cross-section). Quindi, generare un'immagine radar significa estrapolare dalle caratteristiche del segnale retrodiffuso, le informazioni concernenti la superficie illuminata che a sua volta lo ha generato. Le operazioni che consentono di generare un'immagine a partire dai dati grezzi sono comprese all'interno del processo di focalizzazione (focusing), che deve essere di tipo "phase-preserving": la fase del segnale riflesso dal bersaglio a terra deve restare proporzionale alla distanza tra il bersaglio e il sensore (Allen, 1995, Just e Bamler, 1994). Nella prima parte del paragrafo sono trattati gli aspetti teorici fondamentali del radar imaging, per poi passare alla descrizione generale della procedura di focalizzazione. *La lettura dei paragrafi relativi al "Signal Processing" non è indispensabile alla comprensione delle successive implementazioni dell'interferometria radar illustrate in questo studio ma vuole essere di aiuto al lettore interessato per approfondire alcuni concetti sulla generazione stessa delle immagini radar.*

1.4.1 Il matched filter.

Il matched filter è un filtro lineare con la capacità di aumentare il rapporto segnale/rumore (SNR) in presenza di noise stocastico cumulativo. I filtri adattativi sono di utilizzo comune nel radar, dove si cercano similitudini tra i segnali inviati e quelli riflessi. Per esempio, la compressione dell'impulso è realizzata attraverso l'utilizzo di un filtro adattativo. Questi filtri a due dimensioni sono comunemente utilizzati nell'elaborazione delle immagini, per esempio per migliorare il SNR. Supponiamo d'inviare a terra un impulso di microonde $\mathbf{p}(\mathbf{t})$ e registrare l'impulso riflesso $\mathbf{g}(\mathbf{t})$ in modo da determinare la radar cross-section σ in funzione dello slante range. Matematicamente l'impulso $\mathbf{g}(\mathbf{t})$ è il risultato di un'operazione di filtraggio $\mathbf{p}(\mathbf{t})$ attraverso la funzione filtro σ ; dunque $\mathbf{g}(\mathbf{t})$ può essere rappresentata da un integrale di convoluzione:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(\tau) p(t - \tau) d\tau = \sigma * p \quad (1.11)$$

essendo:

- $\tau = 2R/c =$ tempo necessario alle onde per raggiungere il bersaglio e ritornare.

Lo scopo è quello di elaborare la funzione $\mathbf{g(t)}$ per ottenere $\sigma(\mathbf{t})$; uno dei metodi migliori (Curlander e McDonough, 1991) consiste nel filtraggio della funzione $\mathbf{g(t)}$ utilizzandone un'altra. Essenzialmente, questa operazione di filtraggio è definita *matched filtering* e il risultato ottenuto è un'altra funzione $\mathbf{m(t)}$. Se la funzione di autocorrelazione $\rho(\mathbf{t})$ dell'impulso trasmesso è uguale a $\delta(\mathbf{t})$ (funzione di Dirac), il risultato del filtraggio adattativo $\mathbf{m(t)}$ sarà proporzionale alla radar cross-section $\sigma(\mathbf{t})$ e dunque alle caratteristiche di riflettività del bersaglio. Per ottenere una buona *range resolution* si deve utilizzare un impulso breve e di grande energia. Essendo problematica la generazione di un segnale con simili caratteristiche, viene utilizzato un segnale modulato in frequenza (**chirp**). Nei paragrafi successivi saranno trattate le proprietà fondamentali di questo tipo di segnale.

1.4.2 Registrazione del segnale riflesso

Un impulso retrodiffuso subisce uno shift in frequenza dovuto all'effetto Doppler a causa del movimento relativo tra l'antenna e il bersaglio a terra. La differenza tra il massimo e il minimo valore della frequenza Doppler durante un attraversamento dell'antenna footprint da parte del bersaglio costituisce una banda di frequenza (Doppler bandwidth). Il sistema SAR è progettato in modo tale da campionare la Doppler bandwidth senza aliasing, fissando cioè la PRF a un valore tale da prevenire la sovrapposizione dei due impulsi di ritorno consecutivi (http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses). Poiché la frequenza Doppler passa da valori negativi (per bersagli in avvicinamento all'antenna) a valori positivi (per bersagli in allontanamento dall'antenna), la Doppler bandwidth è simmetrica in rapporto allo zero. Risulta impossibile, date due frequenza Doppler uguali in valore assoluto, distinguerle in base al segno. Tuttavia per eseguire adeguatamente il signal processing del segnale campionato, *tale distinzione deve essere effettuata. Da ciò deriva l'impossibilità di utilizzare i numeri reali per rappresentare i dati SAR campionati*. La funzione d'onda può essere rappresentata da numeri complessi, scomponendola in due termini, quello di fase e quello di ampiezza (Figura 12)

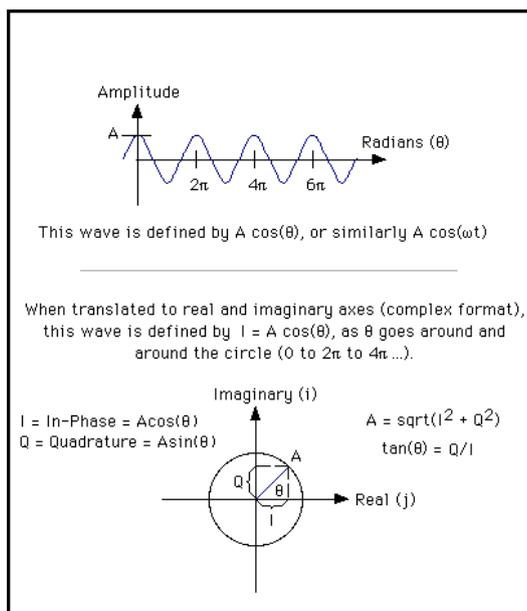


Figura 12. Rappresentazione della forma d'onda in notazione complessa.

L'operazione di decomposizione (Figura 13) preserva la fase e l'ampiezza del segnale di ritorno. Si ottiene così una matrice di dati RAW di numeri complessi aventi l'ampiezza e la fase corrispondenti all'ampiezza e la fase del segnale retrodiffuso.

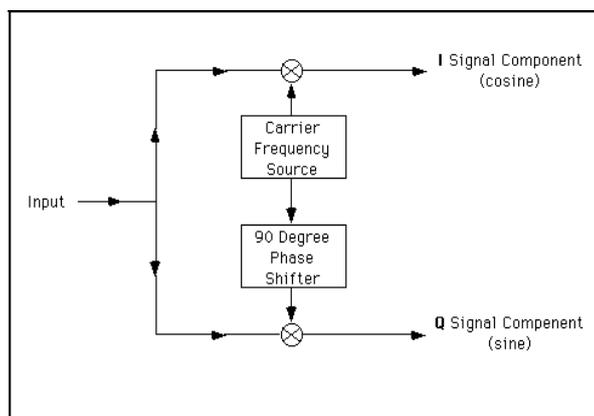


Figura 13. Decomposizione del segnale riflesso nelle componenti "I" e "Q".

1.4.3 Proprietà del chirp pulse: la Range Compression

Il sistema SAR utilizza una particolare forma d'impulso modulato in frequenza, il chirp (Figura 14).

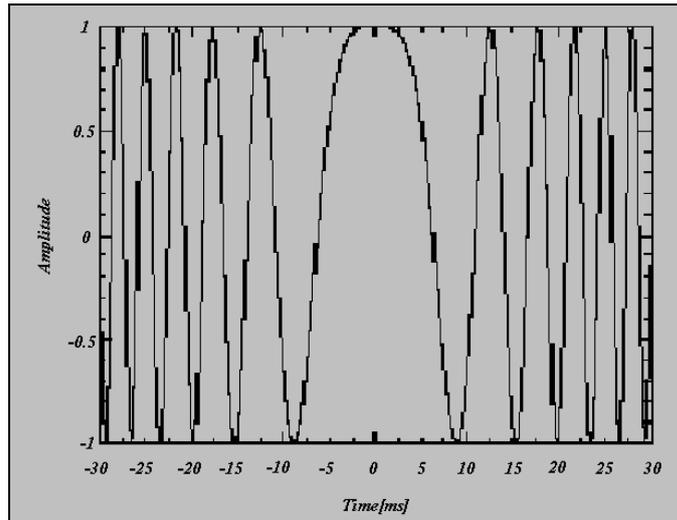


Figura 14. Chirp pulse.

Nella Figura 15 è illustrato il meccanismo della modulazione in frequenza del chirp:

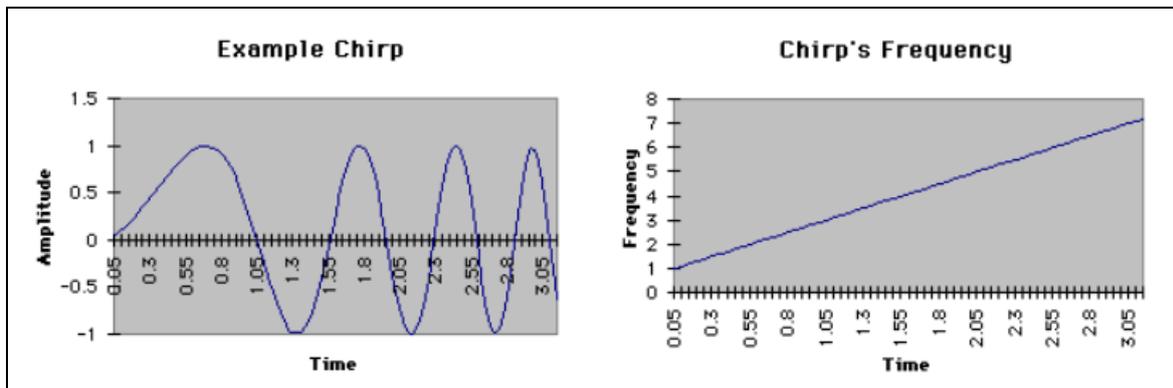


Figura 15. Modulazione in frequenza del chirp.

Esaminando le due immagini si osserva come l'energia del chirp, e dunque l'informazione contenuta distribuita inizialmente in un periodo uguale T (durata dell'impulso), sia compressa attraverso l'autocorrelazione dell'impulso (Figura 16) in un periodo molto più piccolo, pari a:

$$\frac{1}{\beta \cdot T} = \frac{1}{f_0} \quad (1.12)$$

Essendo:

β = chirp frequency versements;

f_0 = frequenza della portante (plus carrier frequency).

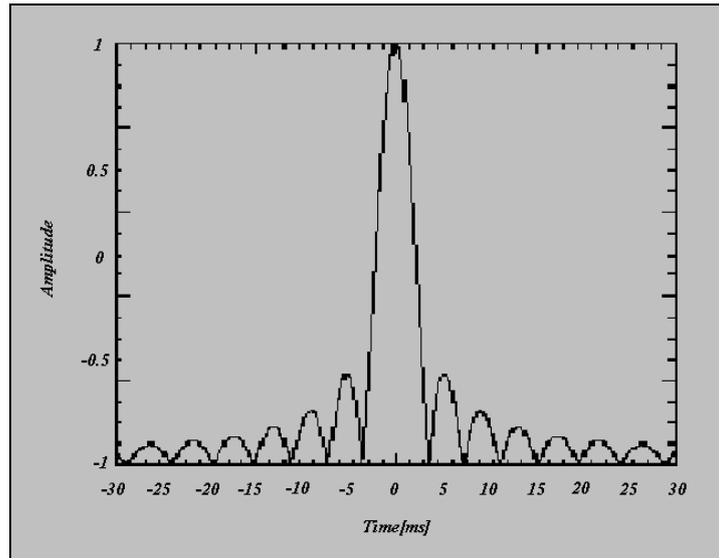


Figura 16. Autocorrelazione del chirp.

Aumentando il valore di f_0 e modulando la banda in frequenza del chirp in modo che la sua energia sia distribuita in un tempo più lungo, quest'ultima sarà compressa in un tempo sempre più corto, conferendo alla funzione di autocorrelazione le caratteristiche della funzione tipo "Delta di Dirac" e permettendo una migliore range resolution.

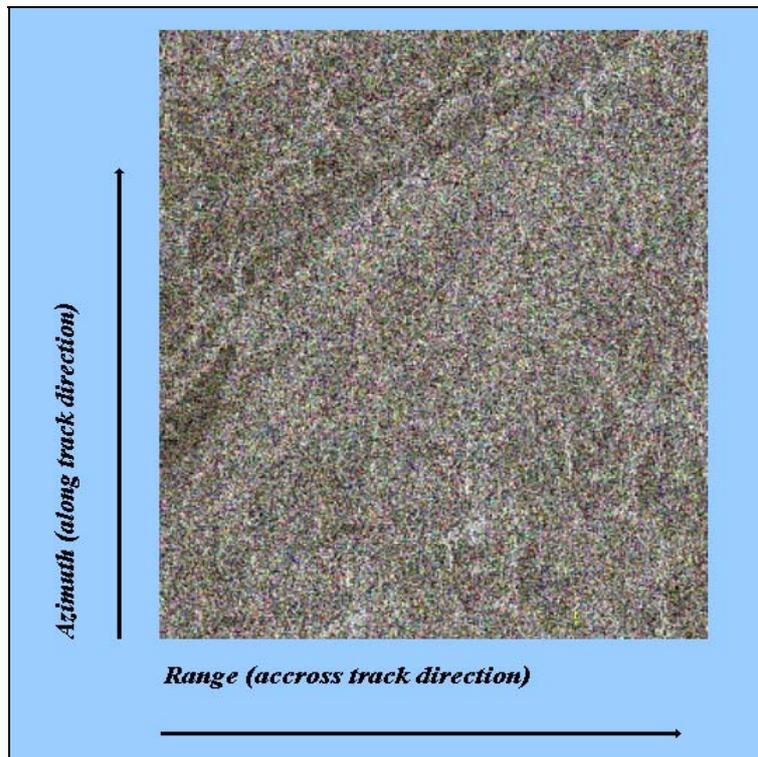


Figura 17. Dati RAW dopo l'operazione di range compression, (vedi figura 5).

Applicando il metodo del matched filtering all'impulsione riflessa autocorrelata si ottiene la specifica radar cross-section e dunque le caratteristiche di riflettività della superficie illuminata. Questa operazione di signal processing è denominata **range compression** (Figura 17).

1.4.4 Strip mapping e azimuth compression

Si è già accennato al metodo dello “Strip-mapping” come un metodo comunemente impiegato dal Radar ad Apertura Sintetica per l'acquisizione dei dati e consiste in uno scanning della zona interessata parallela alla direzione di volo. Consideriamo s la variabile tempo in azimuth direction e t la variabile tempo in slant range direction. Queste due grandezze temporali sono considerevolmente diverse tra di loro: la variabile t (fast time) rappresenta l'intervallo di tempo tra i due impulsi riflessi consecutivi, pari all'inverso della frequenza di campionamento in slant range direction (circa 18 MHz), mentre la variabile s (slow time) rappresenta l'intervallo di tempo tra due impulsi consecutivi, pari all'inverso di PRF (circa 1600 Hz).

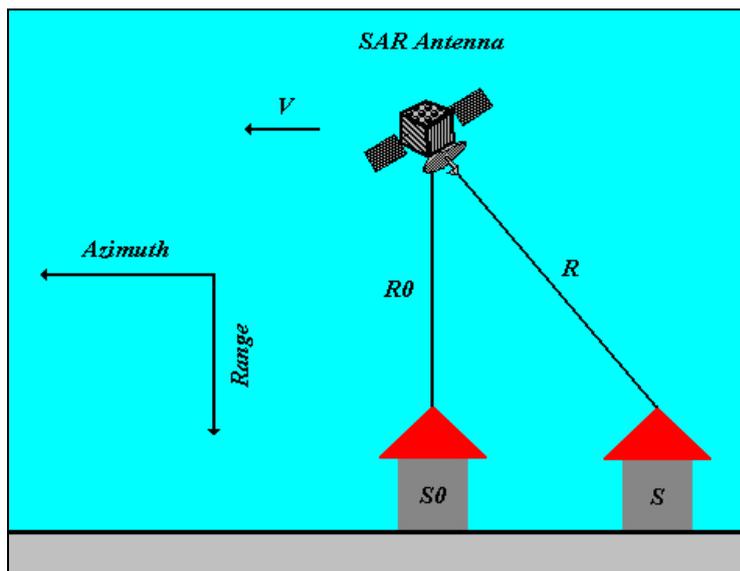


Figura 18. Geometria SAR semplificata per l'acquisizione dei dati in strip-mapping.

Consideriamo un bersaglio sulla superficie terrestre (Figura 18). Indichiamo con s_0 il valore della variabile s quando il bersaglio si trova al centro dell'antenna footprint, con r_0 la distanza slant range all'istante s_0 e con x_0 la posizione del bersaglio lungo la direzione di volo nello stesso istante.

Valgono le seguenti relazioni :

$$x_0 = V \cdot s_0 \quad (1.13)$$

$$r_0 = \frac{c \cdot t_0}{2} \quad (1.14)$$

essendo:

- V = velocità della piattaforma SAR lungo la direzione di volo;
- c = velocità della luce (velocità nel vuoto).

Considerare che:

- all'interno dell'antenna footprint la superficie terrestre è considerata piana e stazionaria;
- la linea ideale che unisce il centro dell'antenna footprint con il nadir è perpendicolare alla direzione di volo (broadside antenne). In questo caso dunque la generica distanza slant range $r(s)$ può essere espressa come :

$$r(s) = \sqrt{V^2 \cdot (s - s_0)^2 + r_0^2} \quad (1.15)$$

- data la considerevole differenza nell'ordine di grandezza delle variabili tempo s e t , si assume che il sensore resta immobile lungo la direzione di volo per il tempo necessario all'impulso trasmesso di arrivare a terra e all'impulso riflesso di ritornare all'antenna (start-stop approximation), (Barber, 1985).

La fase dell'impulso riflesso posto alla generica distanza $r(s)$ è dato da:

$$\phi(s) = \frac{4 \cdot \pi \cdot r(s)}{\lambda} \quad (1.16)$$

e dunque:

$$\phi(s) = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{V^2 \cdot (s - s_0)^2 + r_0^2}}{\lambda} \quad (1.17)$$

La frequenza istantanea risulta dunque:

$$f_x(s) = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi}{ds} = -\frac{2 \cdot V^2 \cdot (s - s_0)}{\lambda \cdot \sqrt{V^2 \cdot (s - s_0)^2 + r_0^2}} = -\frac{2 \cdot V^2 \cdot (s - s_0)}{\lambda \cdot r(s)} \quad (1.18)$$

Si può concludere che la frequenza istantanea del segnale retrodiffuso è equivalente alla frequenza Doppler prodotta da un bersaglio in movimento relativo in rapporto alla piattaforma. Questi principi costituiscono la base di funzionamento dei più comuni algoritmi di

focalizzazione impiegati nell'elaborazione delle immagini SAR (Figura 19), (Bamler, 1992, Heng et al., 1996, Heng et al., 1997).

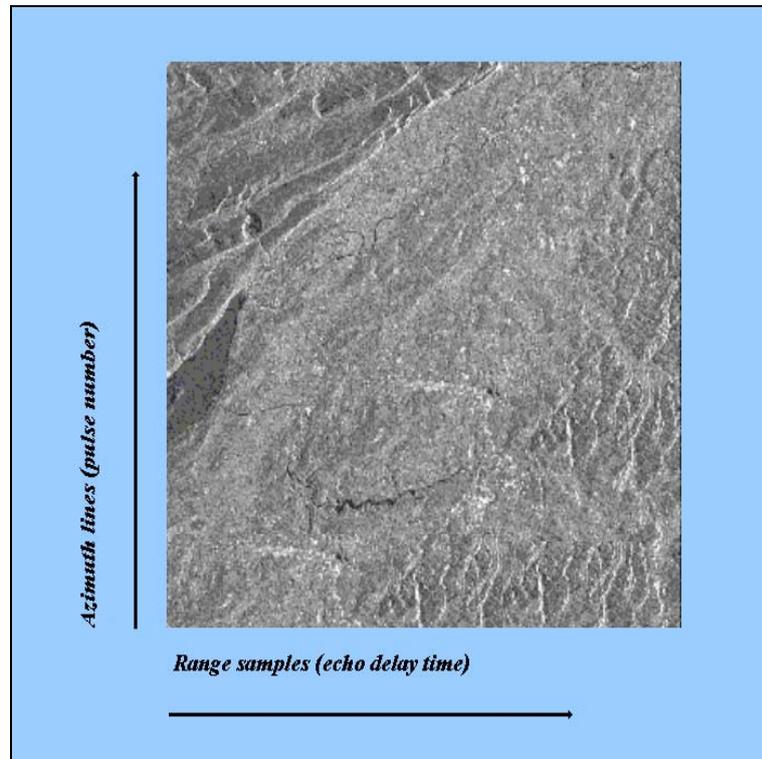


Figura 19. Dati range compressed dopo l'operazione di azimuth compression (vedere figura 5 e 17).

1.4.5 Focalizzazione.

Interposti alla trasmissione dell'impulso, il SAR riceve gli echi degli impulsi precedenti e retrodiffusi dal terreno. Dunque, l'eco di un bersaglio puntuale è contenuto nei ritorni di molti impulsi e l'informazione risulta distribuita e sovrapposta a quella di altri bersagli: *il segnale non è focalizzato*. Quindi, i dati grezzi raccolti dal SAR devono essere focalizzati per formare un'immagine. Pertanto con il termine di “*focalizzazione SAR*” (o compressione) si identifica il processo che permette di ottenere a partire da una matrice di dati grezzi, una matrice del coefficiente di backscattering complesso ad alta risoluzione, (Heng, 1997). Lo scopo del processo è di concentrare tutta l'energia del segnale di ritorno relativo ad ogni bersaglio in un unico punto (Figura 20).

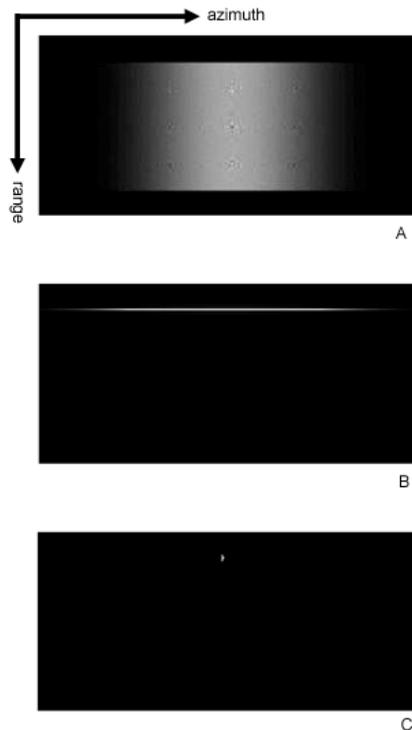


Figura 20. Esempio di focalizzazione per un solo punto sintetico (Sarscape Guide, SARMAP 2008).

In orizzontale è mostrata la direzione in azimuth e in verticale quella in range. **A)** Dati grezzi: l'energia di un singolo punto è diffusa lungo le due direzioni. **B)** Compressione dei dati in *range direction*: il chirp trasmesso (impulsion) è compresso quando gli echi sono distribuiti lungo la direzione di azimuth. **C)** Focalizzazione dopo compressione in *azimut*: tutta l'energia retrodiffusa da una cella di risoluzione base è compressa in un solo pixel.

Durante il processo di focalizzazione, questi passaggi sono eseguiti sull'intera matrice di dati per ottenere un'immagine complessa (Single Look Complex) dove il modulo è legato alla riflettività elettromagnetica e l'informazione di fase alla geometria d'acquisizione e alla topografia del suolo. Conoscendo rispettivamente sia il ritardo d'onda che la combinazione degli echi derivati dalle localizzazioni multiple, questa procedura, realizzata nella direzione perpendicolare (range) e parallela al volo (azimuth), permette di sintetizzare una grande apertura d'antenna.

> La risoluzione spaziale in distanza "r" (slant range) è proporzionale alla durata dell'impulso trasmesso "t":

$$r = ct/2 \qquad c = \text{velocità della luce} \qquad (1.19)$$

Dunque per ottenere risoluzioni in distanza inferiori a 10 metri è necessario trasmettere impulsi di durata inferiore ai 66 ns o, equivalentemente, utilizzare una banda maggiore di 15MHz. Gli impulsi modulati linearmente in frequenza di durata molto maggiore sono successivamente compressi con filtri adattativi durante l'elaborazione numerica dei dati.

> Rispetto alla direzione d'azimut, sfruttando il movimento della piattaforma, in rapporto agli oggetti a terra, si "sintetizza", con un calcolatore, un'antenna di dimensione molto più grande rispetto a quella fisica. In effetti, per avere una risoluzione di 10 metri alla frequenza di 1GHz e alla distanza di 800 km (altezza delle orbite generalmente utilizzate dal SAR satellitare) sarebbe necessaria un'antenna lunga più di 10 Km, evidentemente non praticamente realizzabile. *Finalmente, con il termine di "focalizzazione" SAR si può indicare il trattamento dei dati grezzi che permette di comprimere gli impulsi e di sintetizzare l'antenna.* Esistono diversi algoritmi e implementazioni relativamente alle procedure di focalizzazione, la cui rivisitazione è stata fornita da *Bamler and Hartl (1998)*. La fase misurata dell'impulso retrodiffuso può essere rappresentata con l'utilizzo di numeri complessi (da cui deriva il nome d'*immagini complesse* per le immagini SAR):

$$Z(x,y) = I(x,y) \cdot \exp[i \cdot \phi(x,y)] \quad \text{essendo:} \quad (1.20)$$

- Z = valore complesso che rappresenta il pixel sull'immagine;
- x, y = coordinate del pixel sull'immagine;
- I = valore d'intensità del pixel (ampiezza dell'impulso retrodiffuso);
- ϕ = valore di fase del pixel (fase dell'impulso retrodiffuso).

In questo modo, un sistema SAR è capace di fornire immagini coerenti con informazione d'intensità, relativa alla riflettività degli oggetti, e di fase, legata alla distanza tra bersaglio e radar.

1.5 Parametri SAR

Le interazioni tra il segnale del radar e gli oggetti da investigare sono caratterizzati da parametri legati sia al sistema che alla superficie del terreno. Di seguito sono illustrati i parametri legati più direttamente alle caratteristiche del terreno come la retrodiffusione, la rugosità, l'umidità del suolo e la geometria di acquisizione. L'influenza delle caratteristiche della superficie investigata non permettono a tutto l'impulso trasmesso dall'antenna di essere trasformato in retrodiffusione. Quindi, più il segnale radar riflette verso il sensore, più l'immagine sarà luminosa e viceversa, (Figura 21).

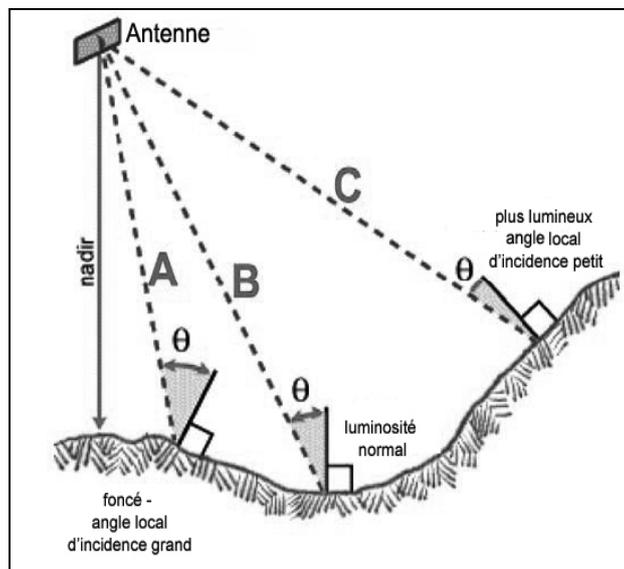


Figura 21. Influenza dell'angolo locale d'incidenza.

La pendenza del terreno e la forma o struttura del bersaglio influenza l'angolo locale d'incidenza e dunque l'intensità della retrodiffusione radar. Questa influenza l'intensità luminosa di ogni pixel. Le pendenze più perpendicolari al radar avranno un più piccolo angolo locale d'incidenza, un maggior ritorno di energia e pixel più luminosi. Reciprocamente, l'immagine sarà più scura quando l'angolo di incidenza è grande. Questo concetto è importante per comprendere come i parametri del terreno influenzano le immagini.

Per una corretta interpretazione delle immagini derivate dai sensori radar risulta molto importante analizzare i parametri che condizionano le interazioni tra il radar e la superficie del terreno. Di seguito, saranno illustrate i seguenti parametri caratteristici:

- Il Radar Backscattering;
- Le proprietà dielettriche complesse;
- Le deformazioni geometriche;
- Gli effetti di "speckle".

1.5.1 Backscattering

Il concetto di backscattering è legato alla parte del segnale radar che è retrodiffuso verso l'antenna (Figura 22, Figura 23).

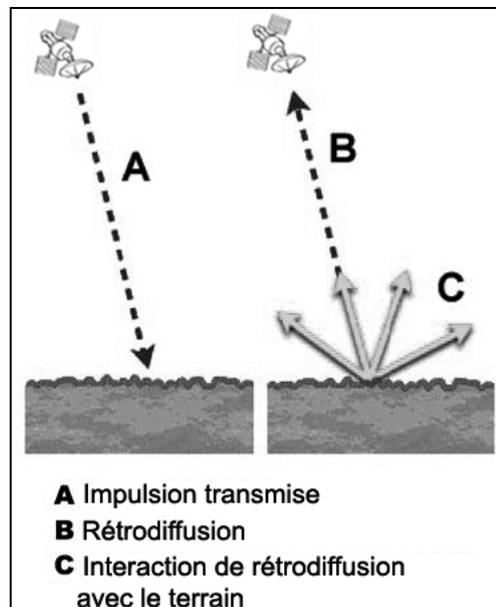


Figura 22. Backscattering.

La maggior parte dei terreni può essere considerata avere una struttura che non permette ad una parte del segnale radar di essere riflessa nella direzione di trasmissione. Ciò causa una dispersione diffusa del segnale e spiega le tonalità medie in un'immagine: le diverse tonalità di grigio tra il nero e il bianco.

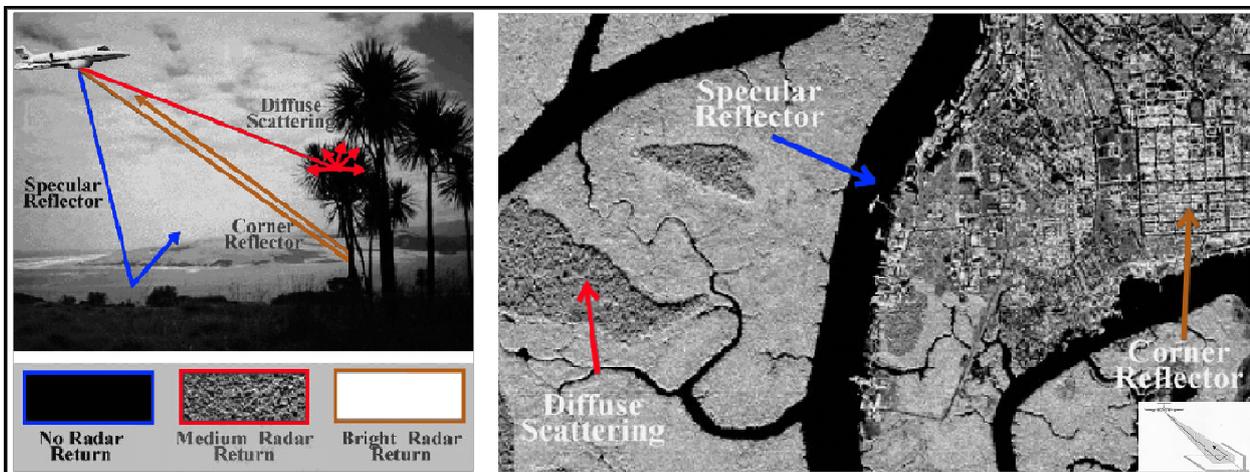


Figura 23. Traiettorie del segnale inviato dall'antenna e effetti sull'immagine dei diversi tipi di retrodiffusione.

Le superfici molto lisce agiscono come uno specchio e diffondono il segnale del radar lontano dall'antenna, con assenza o modesto ritorno della retrodiffusione. Ne risultano immagini scure "specular reflector". Naturalmente l'acqua turbolenta produrrà qualche angolo locale d'incidenza che si rifletterà più direttamente all'antenna, generando piccoli ritorni luminosi da cui "noise" evidente sulle immagini delle superfici d'acqua. Una situazione particolare che crea un ritorno molto forte (pixel molto luminosi) si verifica quando il segnale emesso incontra una superficie come un "corner reflector". Ciò si produce quando un bersaglio è sul terreno con un angolo perpendicolare alla terra. Il lato di un edificio ne è un tipico esempio. La maggior parte del segnale è riflesso.

1.5.2 Costante dielettrica complessa.

La costante dielettrica complessa (CDC) è una misura delle caratteristiche elettriche dell'oggetto sul terreno. Una CDC più alta aumenta la riflettività radar. La presenza di umidità nel terreno o vegetazione corrisponde a una CDC più alta e può aumentare la riflettività del radar avendo per risultato pixel più luminosi (Figura 24). Gli oggetti metallici come i ponti, le ferrovie e i tetti in ferro forniscono ugualmente dei ritorni forti del segnale e quindi immagini molto luminose.

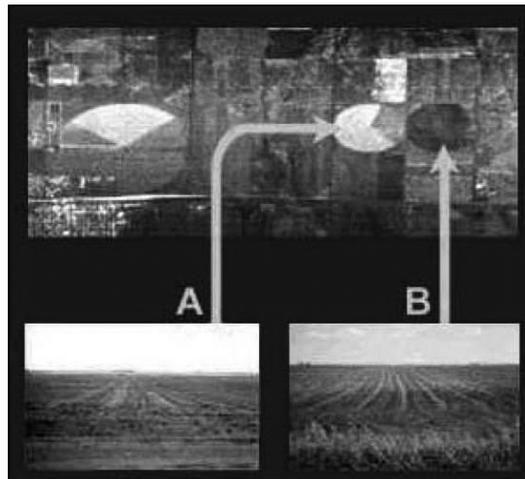


Figura 24 Esempio dell'influenza della CDC sul radar backscattering.

Nell'immagine, il campo A è stato recentemente irrigato e il livello di umidità più alto fornisce un ritorno più luminoso del campo B secco.

1.5.3 Deformazioni geometriche

Una particolarità delle immagini derivate dai sistemi SAR concerne le deformazioni geometriche derivate dal sistema di acquisizione. Le due dimensioni spaziali dell'immagine SAR sono legate alla distanza dell'oggetto dal sensore (slant range) e alla posizione della piattaforma lungo la direzione di movimento (azimuth), (Figura 25).

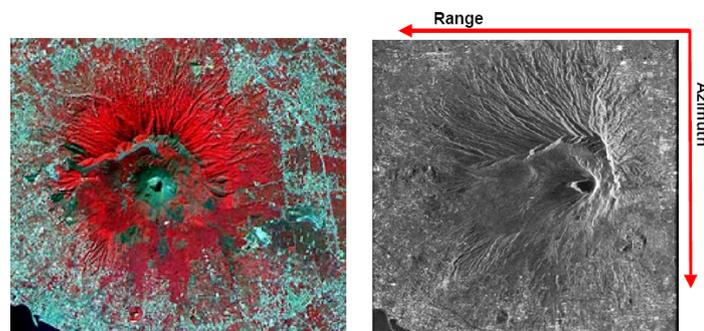


Figura 25 Coordinate geografiche VS coordinate SAR per un'immagine Spot (sinistra) e ERS (destra).

Questa rappresentazione conferisce all'immagine SAR delle deformazioni geometriche uguali a quelle di un sistema ottico che osservasse la superficie terrestre con un angolo di vista complementare.

Foreshortening

Il fenomeno del foreshortening causa la caratteristica “compressione” degli oggetti inclinati verso il radar. Al contrario dei sistemi ottici, gli obiettivi disposti sul terreno con pendenza uguale all’angolo di off-nadir (parallelamente all’antenna) risultano tutti alla stessa distanza dal radar e dunque rappresentati nello stesso pixel. Situazione opposta per terreni con pendenza contraria dove il SAR permette la migliore risoluzione. La compressione su un singolo pixel, con un segnale estremamente elevato, genera un aspetto relativamente più luminoso dei versanti così inclinati in questo modo. Queste zone sono dette di “foreshortening”, (Figura 26, Figura 27).

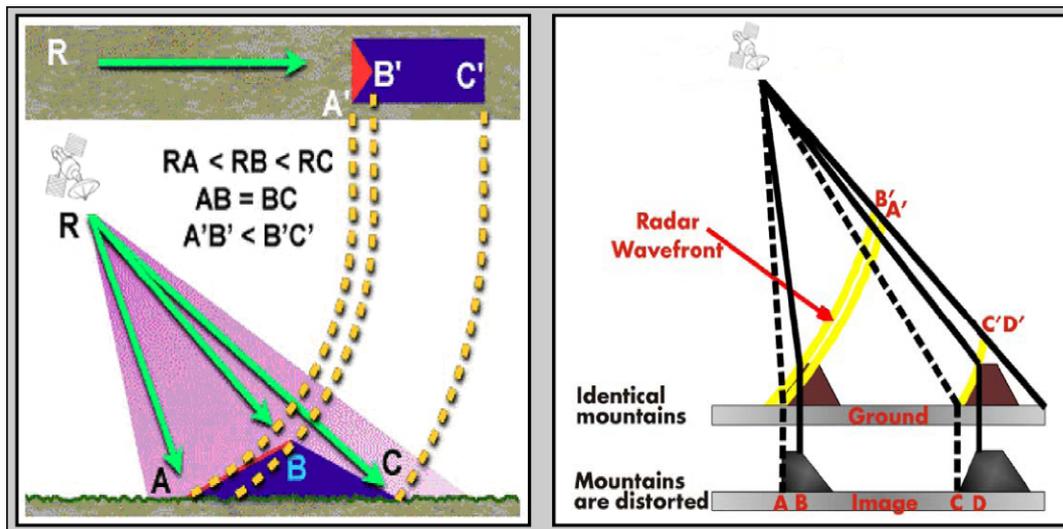


Figura 26. Foreshortening I (Crawford, 1999).

(A sinistra) La vera distanza al suolo tra la base della montagna A, la cresta B e la base C sono uguali. A causa della geometria “side looking” del sistema SAR, il ritorno dell’impulso radar del punto B è ricevuto prima rispetto a quello proveniente dal punto A. Il risultato è una compressione dell’immagine rappresentata dal rettangolo blu e rosso nella parte superiore del diagramma. (A destra). Il fenomeno è più importante in in near range.

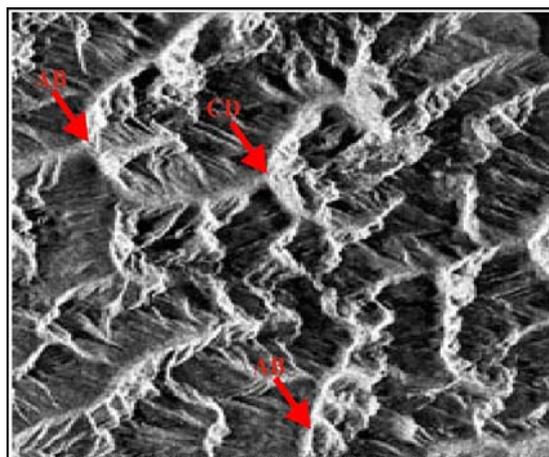


Figura 27. Foreshortening II (Crawford, 1999).

I bordi più luminosi sono le pendenze parallele al SAR. Le pendenze luminose strette (AB) mostrano l’aumento della compressione in near range.

Layover

Il Layover potrebbe essere definito un caso estremo di foreshortening e rappresenta un fenomeno che si produce con angoli di pendenza elevati, più spesso in *near range* (Figura 28, Figura 29).

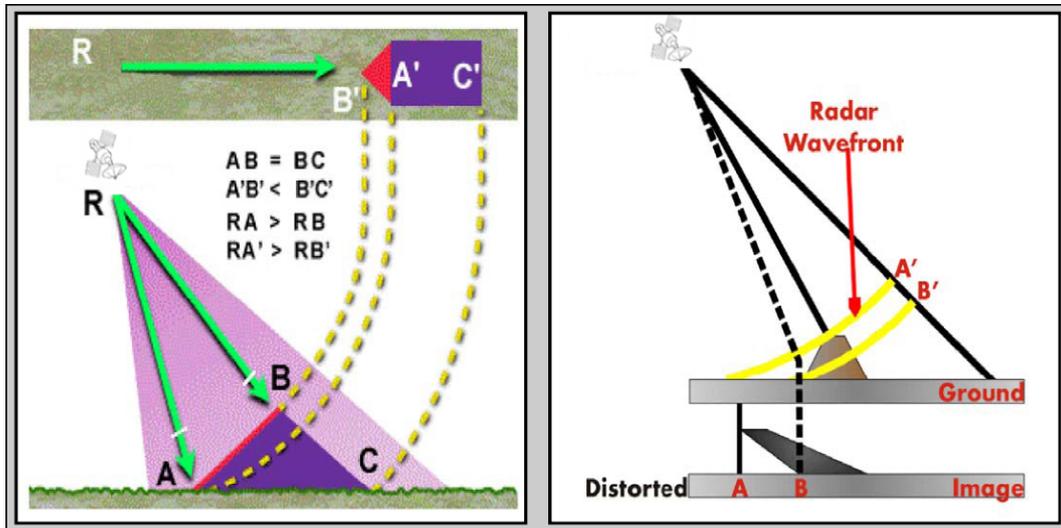


Figura 28. Layover I

(A sinistra) In questo caso la pendenza dei versanti è compresa tra l'angolo di off-nadir e π . Il segnale di ritorno del radar dalla cresta B è ricevuto prima di quello della base A e la cima della montagna, per esempio, risulta più vicino al satellite rispetto alla base e quindi questa appare rovesciata e sovrapposta al terreno. (A destra) Come per il foreshortening, il layover è prevalente in *near range* rispetto al *far range*.

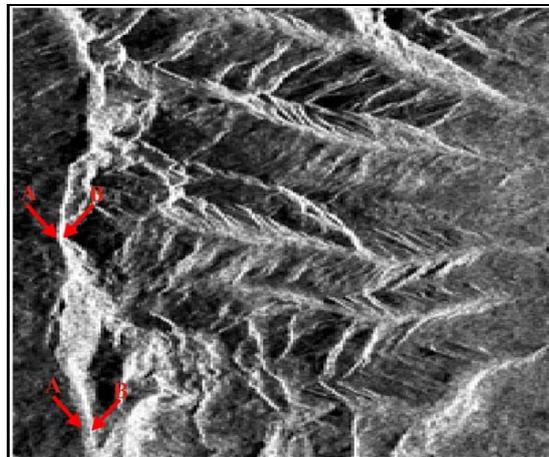


Figura 29. Layover II

Il fenomeno è osservabile nelle zone indicate dalle frecce rosse e sempre in condizioni di *near range*.

Durante l'ortorettificazione di un'immagine SAR quando le zone in layover sono “stirate” di nuovo nella loro posizione corretta, i pixel risultano anch'essi stirati e spesso la deformazione è così spinta che finisce per creare vuoti, (*no data pixel* o “*cornflakes*”), (Figura 30). La situazione è simile a pixel stirati su pendenze ripide nelle ortofoto fotogrammetriche.

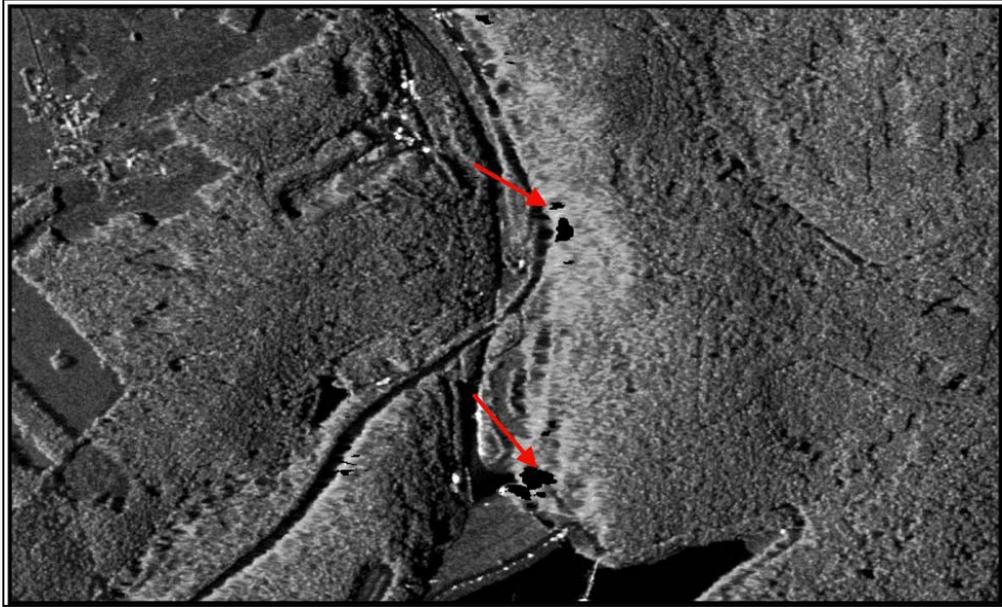


Figura 30. “Cornflakes”. Aree con “no data pixel” per effetto dell’ortorettificazione.

Shadow

Il *radar shadow* rappresenta un caso riscontrato analogamente nelle immagini ottiche. Si osserva quando si possono riconoscere delle zone scure dove nessun segnale di ritorno è ricevuto. I fenomeni di *radar shadow* si producono dietro ad oggetti di grandi dimensioni e sono più frequenti in *far range* (Figura 31). Praticamente si hanno delle zone in “*shadow*” per versanti compresi tra “ $-\pi$ ” e “ $-\pi + \text{l'angolo di off nadir}$ ”.

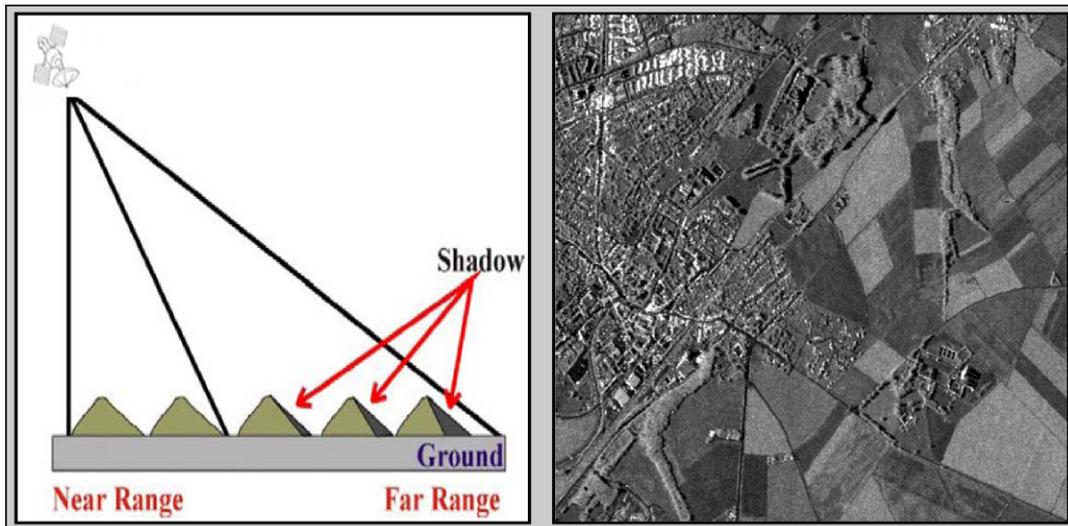


Figura 31. Shadow.

(A sinistra) i fenomeni di “*radar shadow*” si producono dietro a oggetti grandi e sono più frequenti in *far range*; (a destra) le ombre sono osservabili alla destra degli alberi nella parte centrale alta dell’immagine.

1.5.4 Effetto speckle

Ogni valore di un pixel contiene le informazioni relative all'ampiezza e alla fase. Siccome gli echi possono aggiungersi in maniera positiva o negativa, i valori di ampiezza sull'immagine fluttuano intorno ad un valore nominale basato per ogni pixel sulla sua "luminosità" radar che è conosciuta come "speckle effect". In pratica il disturbo dovuto allo "speckle" è un processo intrinseco che degrada la qualità dell'immagine acquisita da un sistema coerente. Esso è dovuto alle interferenze tra gli echi di diversi diffusori nella stessa cella di risoluzione.

L'interferenza locale, che può essere costruttiva o distruttiva in misura praticamente imprevedibile, si manifesta nell'immagine con pixel particolarmente chiari o particolarmente scuri. Effettuare la media di più dati indipendenti sulla stessa porzione di terreno riduce l'effetto dello speckle (SARMAP guide, 2008). Esistono due principali approcci:

- filtraggio "multi-look", separando l'apertura sintetica in più "sotto-aperture" che producono dati indipendenti (differenti bande doppler), (Figura 32);
- calcolo della media (incoerente) tra pixel adiacenti, (Figura 33).

La riduzione dell'effetto speckle si ottiene a spese della risoluzione spaziale e può essere raggiunta attraverso l'utilizzo di differenti tipi di filtraggio.

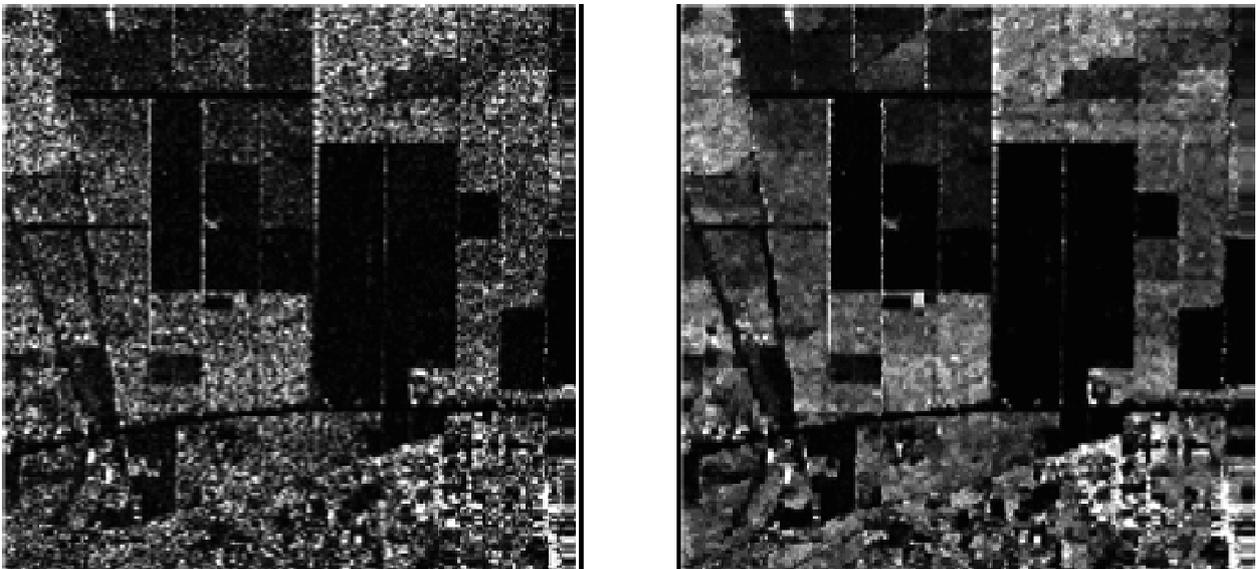


Figura 32. Filtraggio "Multi-look" (Sarscape Guide, SARMAP 2008).

Confronto tra un'immagine SAR, con ENL (Equivalent number of looks) = 1 (a sinistra) e la stessa immagine ottenuta facendo la media di più acquisizioni indipendenti (a destra).

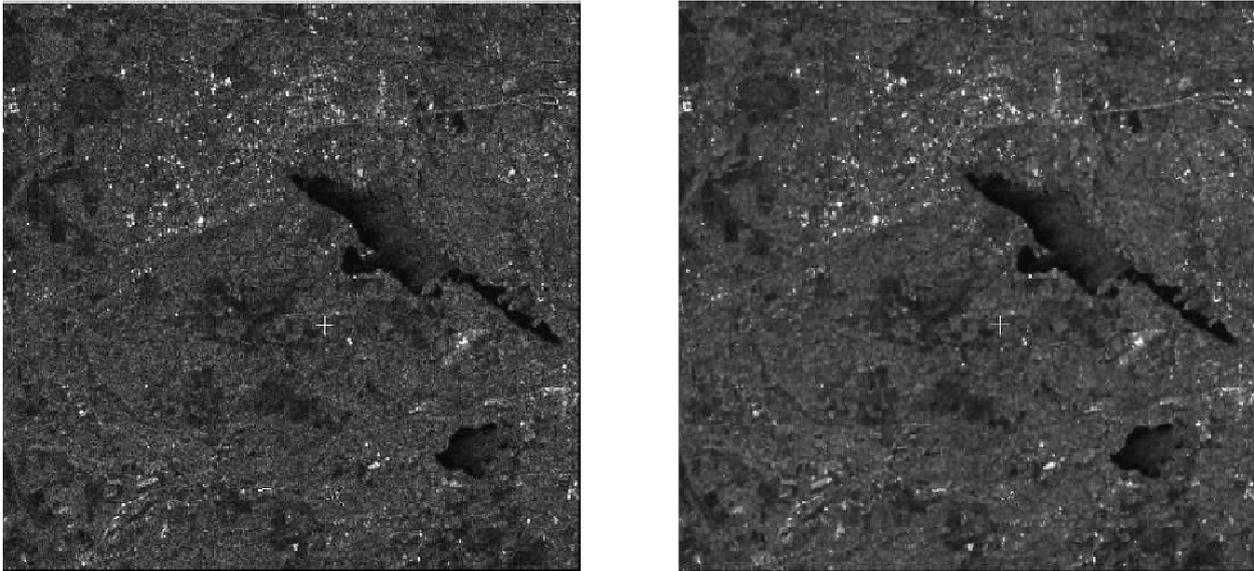


Figura 33. Despeckling con l'utilizzo del "filtro di LEE" (Sarscape Guide, SARMAP 2008).

Il valore del pixel con "noyse" è sostituito da una somma pesata del valore dello stesso pixel, della media e della varianza calcolata su una zona omogenea dell'immagine. L'Enhanced Lee Filter minimizza la perdita d'informazione radiometrica e tessiturale.

1.6 Conclusioni

In molte applicazioni di telerilevamento occorre ottenere risoluzioni spaziali spinte, non raggiungibili con tecniche radar tradizionali. L'applicazione della tecnica dell'antenna sintetica, su cui si basano appunto i radar di tipo SAR (Synthetic Aperture Radar), consente di ottenere elevate risoluzioni azimutali con aperture di antenna fisicamente contenute.

La comprensione del procedimento attraverso cui un sistema SAR acquisisce i dati agevola la loro corretta valutazione e ne consente l'utilizzo come immagini interpretabili. Sensori di questo tipo forniscono immagini caratteristiche nettamente distinte dalle tipiche immagini ottiche. L'adeguata interpretazione dei parametri acquisiti e delle osservazioni fatte non può prescindere dall'esatta conoscenza dei parametri caratteristici di un'immagine SAR (es: deformazioni geometriche, speckle). In relazione all'obiettivo ricercato questi parametri possono essere considerati come informazioni sfruttabili o perturbazioni da eliminare.

Capitolo 2 Interferometria SAR

In questa sezione sono presentate le nozioni fondamentali dell'interferometria SAR con il dettaglio necessario per comprendere le osservazioni derivate dalle misure di fase interferometrica fatte in questa dissertazione. Dopo la presentazione dei principi di base, sono illustrati i limiti dell'applicazione sia inerenti il carattere stesso dell'informazione che le restrizioni sull'accessibilità dei dati.

2.1 La fase interferometrica

Il concetto di base nelle acquisizioni SAR per misure interferometriche è la valutazione e la misura del valore di fase del segnale radar complesso. In un'immagine SAR, per ogni elemento di risoluzione, il segnale radar retrodiffuso di ritorno all'antenna, è rappresentato dalla somma coerente degli echi di tutti i diffusori individuali nel terreno (Monti Guarnieri, 2005). Il modo esatto con cui i contributi dei differenti diffusori sono aggiunti nel segnale osservato non è prevedibile. In questo senso la fase del segnale radar di una sola immagine SAR è effettivamente aleatoria e non sfruttabile. Tuttavia, se due acquisizioni radar indipendenti sono eseguite realizzando la stessa geometria di vista sulla medesima zona, la somma dei contributi dei diversi diffusori è in gran parte identica in modo che la differenza di fase tra le due acquisizioni non sia aleatoria. Le immagini possono essere "interferite", semplicemente come moltiplicazione di complessi coniugati. Generalmente, la seconda immagine è acquisita da una posizione leggermente diversa e ricampionata nella stessa geometria della prima. La fase così generata è data dalla differenza di fase tra le due immagini. Il termine "interferometria" oggi è diventato un termine relativamente diffuso vista la varietà di applicazioni che gli sono riferite. Bamler e Hartl (1998) propongono di utilizzare il termine di interferometria radar per indicare *“ tutti i metodi che utilizzano almeno due immagini SAR complesse per ottenere informazioni supplementari sugli oggetti presenti in una sola immagine, sfruttando la fase del segnale SAR ”*.

Attualmente, le sole immagini SAR che ricoprono superfici sufficientemente grandi e con una ripetizione temporale adeguata allo studio delle deformazioni della superficie terrestre, sono

quelle acquisite dai sensori satellitari. L'apporto d'informazione presuppone la variazione di almeno un parametro di acquisizione tra le due immagini. Per lo studio delle deformazioni della superficie terrestre, sarebbe sufficiente la variazione della sola data di acquisizione. In pratica, bisogna considerare anche altre differenze tra le immagini causate da cambiamenti di posizione e orientazione del satellite. Oltre a quelli relativi ai parametri di acquisizione, bisogna aggiungere poi tutti quelli dell'ambiente osservato che non sono direttamente legati a spostamenti della superficie. I mutamenti "parassiti" tra due acquisizioni SAR, che si sovrappongono a quelli più strettamente legati allo spostamento, devono essere accuratamente valutati e saranno trattati alla fine del prossimo capitolo.

Uno dei prodotti principali dell'interferometria radar è l'*interferogramma*. Esso è rappresentato da un'immagine in cui ogni pixel rappresenta un numero complesso avente come modulo e fase rispettivamente l'ampiezza e la fase dell'impulso retrodiffuso da un bersaglio con localizzazione specifica nella zona investigata. Più in particolare questi rappresentano:

1. Il risultato della combinazione delle retrodiffusioni di tutti gli oggetti appartenenti alla stessa cella di risoluzione ;
2. La rotazione di fase dovuta al percorso.

In particolare la fase di ogni pixel è prodotta dalla somma di due termini:

$$\begin{aligned} \phi_s & \text{ legata ai "retrodifusori",} \\ \phi_r = 4\pi r/\lambda & \text{ dove "r" è la distanza piattaforma-pixel,} \\ & \text{e "λ" la lunghezza d'onda del segnale.} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Il valore di "λ" è di pochi centimetri in rapporto ad "r": il secondo termine di fase contiene decine di milioni di angoli giro. Ancora, il termine di fase legato ai retrodiffusori è accidentale. Si può concludere che la fase di una sola immagine SAR risulta *assolutamente inutilizzabile* (Ferretti et al.1998). Se adesso si considera la differenza di fase tra due immagini SAR riprese da angoli di vista leggermente diversi, il termine di fase legato ai retrodiffusori si cancella e il termine di fase rimanente è dato da:

$$\phi = 4\pi\Delta r/\lambda \quad \text{dove " Δr " è la differenza tra il sensore} \quad (2.2) \\ \text{e la stessa cella di risoluzione.}$$

La fase "φ" contiene ancora un numero molto elevato di angoli giro ed è dunque conosciuta a meno di un grande numero di multipli interi di 2π . Tuttavia passando da una cella di risoluzione

a quella contigua, la variazione di “ ϕ ” è generalmente sufficientemente piccola da non presentare ambiguità di 2π (Ferretti, 1998). La fase “ ϕ ” è detta “*fase interferometrica*” e ad essa risulta legata l’informazione di variazione di “ Δr ” (misurata in frazioni di lunghezza d’onda λ) tra pixel di un’immagine SAR. Conosciuta la posizione dei due satelliti, la misura di “ Δr ” può essere utilizzata per derivare l’elevazione relativa tra i pixel dell’immagine e, dunque, generare una carta numerica di elevazione del terreno. Oppure, conoscendo il Modello Tridimensionale del Terreno, è possibile risalire a partire da “ Δr ” ad eventuali deformazioni millimetriche della superficie terrestre tra due osservazioni successive. La precisione della misura di “ Δr ” è legata al “rumore di fase” presente sulle immagini SAR. Se le immagini SAR utilizzate per calcolare la fase interferometrica sono riprese simultaneamente (e dunque il contributo della fase dei retrodiffusori si annulla) il rumore di fase è minimo e la precisione della misura di “ Δr ” migliore di $\lambda/20$ (pochi millimetri), (Ferretti, 1998). Se al contrario le immagini SAR sono riprese con un certo intervallo di tempo il rumore di fase dipende essenzialmente dal cambiamento dei retrodiffusori sul terreno e la precisione della misura di “ Δr ” presenta una forte variabilità. Ciò rappresenta certamente un inconveniente per le applicazioni quantitative come la generazione di Modelli Digitali di Superficie e la misura di deformazioni della superficie terrestre ma può rappresentare un’informazione per le classificazioni di immagini e l’estrazione di parametri qualitativi.

2.2 Prodotti base derivate dal processing SAR

I prodotti base derivati dal processing SAR sono i seguenti:

- Immagini d'intensità;
- Mappe di coerenza;
- Interferogrammi.

2.2.1 Immagini d'intensità.

Nelle immagini d'intensità è rappresentato il numero digitale che descrive l'ampiezza del segnale retrodiffuso da ogni bersaglio individuale presente nella scena. Sono immagini in bianco e nero: colori che rappresentano rispettivamente la maggiore o minore capacità di retrodiffusione.

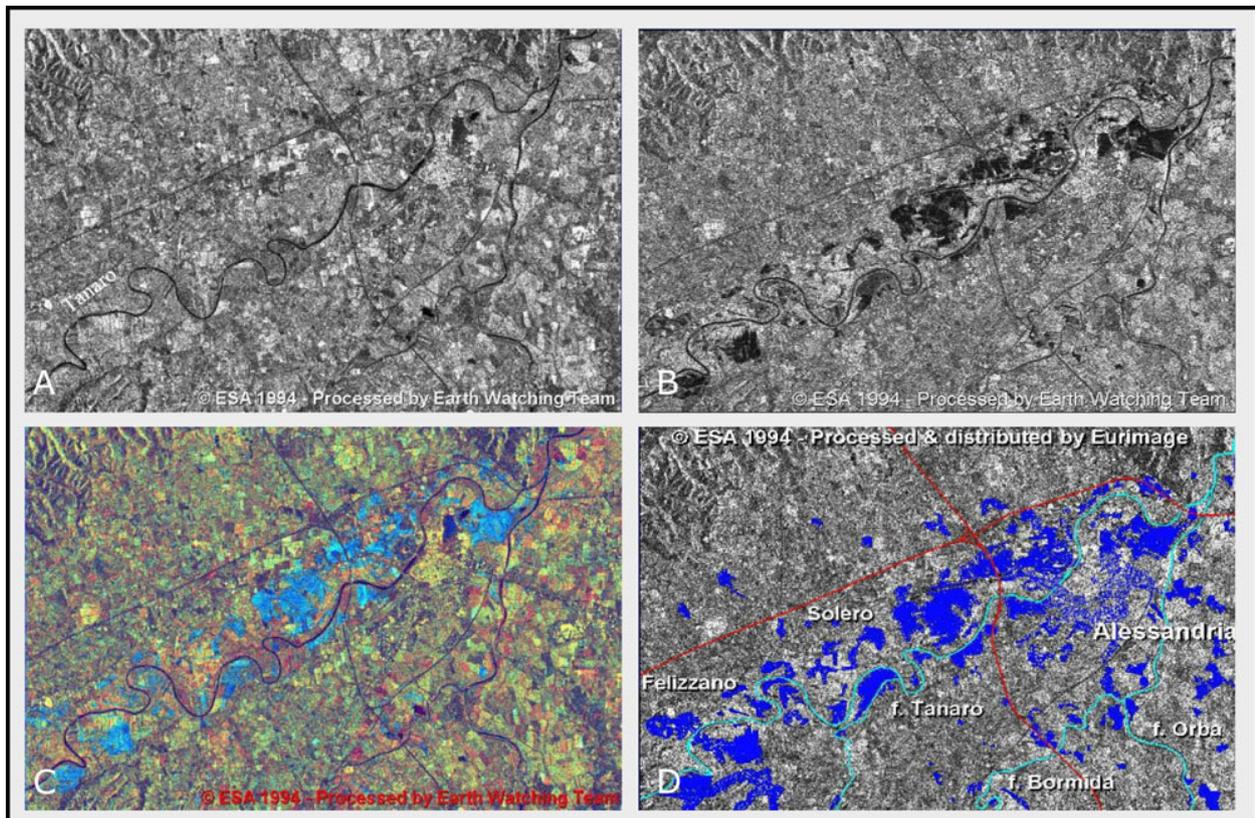


Figura 34. Immagini di intensità (modulo).

In *A* una parte del territorio della provincia di Alessandria nell'Ottobre di 2004 prima della forte alluvione che ha colpito la zona. In *B* la stessa zona alla fine del mese di Novembre dopo l'alluvione. Si possono facilmente distinguere le zone più scure a causa della presenza dell'acqua. In *C* un'immagine ottenuta dalla combinazione RGB di immagini d'intensità radar. In *D* contorni vettoriali delle zone più interessate dall'alluvione ottenute dopo operazioni di map algebra sui pixel delle immagini d'intensità radar prima e dopo l'alluvione, (ESA, 1994).

L'ampiezza (energia) di un impulso retrodiffuso è espressa attraverso il “*coefficiente di backscattering* σ^0 ”. Questo è funzione delle caratteristiche dell’impulso trasmesso (lunghezza d’onda e angolo d’incidenza), delle caratteristiche di rugosità e delle proprietà dielettriche del bersaglio (contenuto d’acqua). I fattori elencati hanno influenza diversa secondo la lunghezza d’onda della radiazione utilizzata. Il coefficiente di backscattering viene generalmente estratto come quadrato dell’ampiezza del segnale complesso registrato dal sensore radar. Confrontando più immagini della stessa zona, riprese in momenti differenti, è possibile discriminare variazioni nel meccanismo di diffusione dalla superficie che possono indicare variazioni delle caratteristiche fisiche. Per esempio, immagini SAR di una zona riprese prima e dopo un’inondazione mostrano differenze significative nel coefficiente di backscattering radar. A causa dell’acqua che le ricopre, le zone inondate appaiono più scure. Così, su un’immagine multitemporale ottenuta sottraendo, pixel per pixel, i valori di immagini SAR susseguenti, è possibile isolare la zona inondata come contorno chiuso (Figura 34). L’informazione può essere eventualmente confrontata con misure di superficie per aumentarne la significatività. Il modulo risulta quindi di fondamentale importanza per acquisire informazioni sulla superficie illuminata dal SAR e la costruzione di carte tematiche.

2.2.2 Mappe di coerenza

Un altro importante prodotto derivato dall’analisi interferometrica è la *coerenza interferometrica*. Essa è la misura di quanto un bersaglio abbia mantenuto costante la sua riflettività (o meglio le sue caratteristiche) tra la prima e la seconda acquisizione. In pratica rappresenta il grado di correlazione tra due immagini SAR. Esse si definiscono perfettamente correlate se ognuna rappresenta la stessa interazione tra l’impulso trasmesso e il target (Prati e Rocca, 1992). Cambiamenti nella rugosità o nelle proprietà dielettriche del target, o un’erronea elaborazione dell’immagine, sono tutte cause di perdita di coerenza. Il modulo della coerenza (normalizzato) assume valori compresi tra 0 (completa incoerenza) e 1 (perfetta coerenza). Date due immagini SAR complesse coregistrate (Z_1 e Z_2), si può calcolare la coerenza interferometrica “ γ ” come rapporto tra le somme coerenti e incoerenti:

$$\gamma = \frac{|\sum Z_1 \cdot Z_2^*|}{\sqrt{\sum |Z_1 Z_1^*| \cdot \sum |Z_2 Z_2^*|}} \quad (2.3)$$

Se la fase dell'oggetto resta costante, la correlazione sarà perfetta ($\gamma = 1$). Nel caso reale, avendo una sola misura a disposizione, ci si deve limitare ad approssciare i valori attesi con la media $\langle \rangle$:

$$\gamma = \frac{\langle Z_1 Z_2^* \rangle}{\sqrt{\langle Z_1 Z_1^* \rangle \cdot \langle Z_2 Z_2^* \rangle}} \quad (2.4)$$

Graficamente questo insieme di dati è rappresentato da un'immagine in bianco e nero (mappa di coerenza): alti valori di coerenza sono indicati dal colore bianco mentre il nero rappresenta valori di coerenza prossimi a zero (Figura 35). Sapere se un obiettivo a terra abbia mantenuto costante la sua riflessione in modulo e in fase è utile per differenti scopi:

- classificazione: la vegetazione ha tipicamente una bassa coerenza a causa del movimento delle foglie e dei cicli stagionali, mentre le zone urbane mantengono una coerenza molto alta;
- analisi di tipo “change détection”: nelle coppie di immagini pré e post avvenimenti disastrosi, per esempio, le zone più colpite tendono a presentare una coerenza bassa. In generale, per conoscere quali aree registrano cambiamenti e quali, al contrario, presentano variazioni più o meno decorrelate.

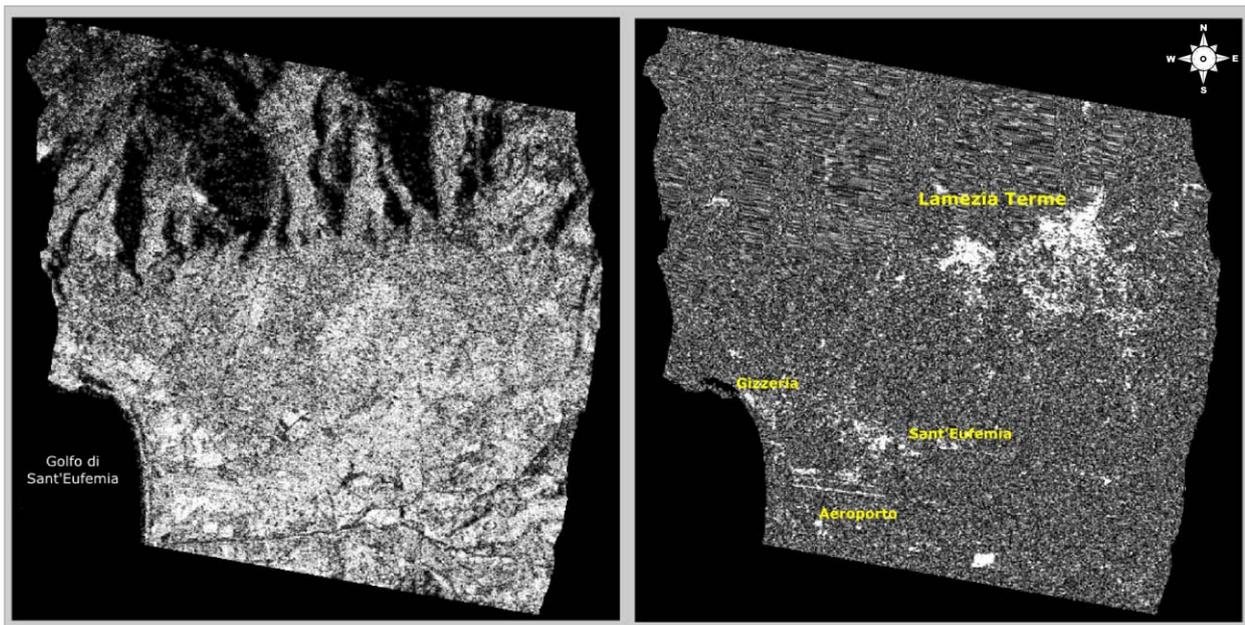


Figura 35. Immagini di coerenza.

A sinistra immagine di coerenza relativa ad una coppia di immagini Tandem riprese cioè a un giorno di distanza per l' hinterland della città di Lamezia Terme. A parte le zone in shadow a nord nell'immagine, tutta l'area presenta una buona coerenza perché dopo un giorno la variazione delle caratteristiche dei target sono molto ridotte. A destra immagine della stessa area ripresa a quasi due anni di distanza. Possono essere individuate solo determinate aree coerenti ascrivibili agli agglomerati urbani e/o strutture come per esempio l'aeroporto.

2.2.3 Interferogrammi

Un interferogramma è un insieme di dati complessi, derivati a partire da due immagini SAR, generalmente acquisite da posizioni differenti ed a una certa distanza temporale. Esso è utilizzato per ottenere informazioni sugli oggetti della superficie terrestre attraverso l'utilizzo di impulsi retrodiffusi (Graham, 1974). Analiticamente, un interferogramma è ottenuto moltiplicando pixel per pixel ogni valore complesso relativo alla prima immagine SAR per il complesso coniugato corrispondente della seconda immagine (Lin et al., 1992). Si ottiene dunque un nuovo insieme di numeri complessi, di cui ognuno avrà come modulo il prodotto dei moduli e come fase la differenza tra la fase dei pixel individuali corrispondenti nelle due immagini (fase interferometrica):

$$Z_{Int} = Z_1 \cdot Z_2^* = I_1 \cdot I_2 \cdot \exp [i \cdot (\phi_1 - \phi_2)] = I_{Int} \cdot \exp (i \cdot \phi_{Int}) \quad \text{essendo} \quad (2.5)$$

- Z_{Int} = interferogramma SAR;
- Z_1, Z_2 = immagini SAR (valori complessi);
- I_1, I_2 = intensità delle immagini SAR;
- ϕ_1, ϕ_2 = fase delle immagini SAR;
- I_{Int} = intensità interferometrica;
- ϕ_{Int} = fase interferometrica.

In particolare, la fase interferometrica è definita essenzialmente dal contributo di tre termini:

- i. Uno di movimento, dipendente cioè dallo spostamento del bersaglio a terra nell'intervallo di tempo tra le due acquisizioni;
- ii. Uno relativo alla contribuzione atmosferica, dipendente dalle caratteristiche dell'atmosfera al momento delle riprese SAR;
- iii. Uno dovuto al "noise", introdotto dal sistema durante l'acquisizione, oltre ad errori di elaborazione dell'immagine di diverso genere.

Il concetto di fase interferometrica è espresso sinteticamente dall'equazione seguente (Ferretti et al., 1999):

$$\phi_{Int} = 4\pi\Delta r/\lambda T + \phi_{atm} + \phi_{noise} \quad (2.5)$$

Essendo " λ " la lunghezza d'onda dell'impulso trasmesso, " T " l'intervallo di tempo tra le due acquisizioni (baseline temporale) e " Δr " spostamento del target. La tecnica interferometrica SAR utilizza l'informazione contenuta nella fase di due immagini normalmente indicate come

immagine M (*master*) e S (*slave*). La grandezza utilizzata per le successive elaborazioni è la differenza di fase tra le due immagini relative alla stessa traccia a terra.

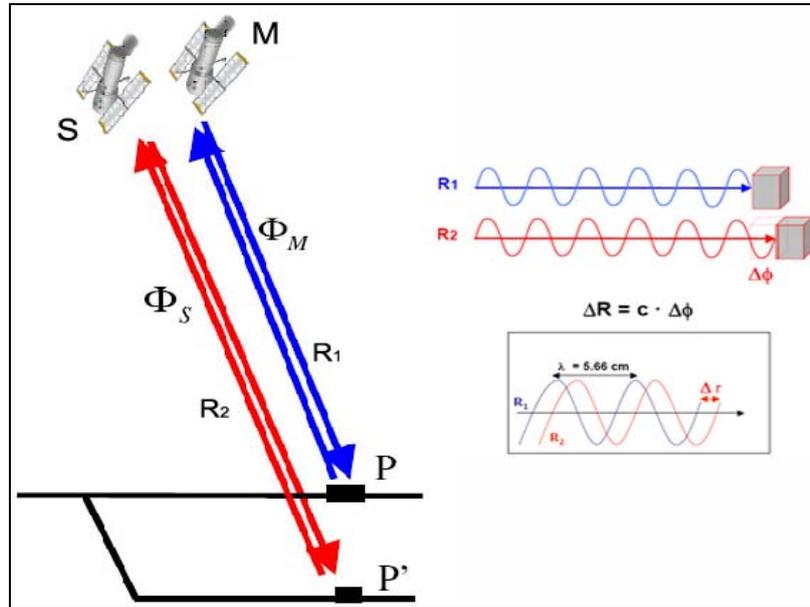


Figura 36. Schematizzazione della misura DInSAR.

M e S sono rispettivamente le acquisizioni successive del satellite; Φ_m e Φ_s la fase misurata tra MP e SP'; R_1 e R_2 le distanze tra MP e SP'; $\Delta\phi$ la differenza di fase tra le due immagini relative alla stessa impronta a terra; Δr è la differenza dei percorsi tra i sensori e la stessa cella di risoluzione.

Se si considera un punto P sul terreno e si suppone che questo non subisca alcuno spostamento tra le due acquisizioni, la fase interferometrica “ ϕ_{Int} ” è funzione della differenza tra le distanze SP e MP (Figura 36). Questa quantità è l'elemento di partenza per la costruzione di Modelli Tridimensionali di Superficie. Se invece il punto subisce uno spostamento verticale da P a P', nell'intervallo temporale tra le due acquisizioni, allora la fase interferometrica “ ϕ_{Int} ” comprenderà un contributo dovuto allo spostamento. In particolare, “ ϕ_{Int} ” è esprimibile come somma dei contributi :

$$\begin{aligned} \phi_{Int} &= \phi_S - \phi_M &= 4\pi \cdot (SP - MP)/\lambda &+ 4\pi \cdot (SP' - SP)/\lambda &+ \phi_{atm} + \phi_{noise} &(2.7) \\ & &= \phi_{topo} &+ \phi_{movimento} &+ \phi_{atm} + \phi_{noise} \end{aligned}$$

dove “ ϕ_M ” e “ ϕ_S ” sono rispettivamente la fase di M e S; “ ϕ_{topo} ”, “ $\phi_{movimento}$ ” e “ ϕ_{noise} ” rispettivamente i contributi dovuti alla topografia, allo spostamento del punto e all'atmosfera ; “ ϕ_{noise} ” è il rumore di fase, SP è la distanza slave del punto P ; “ λ ” è la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica utilizzata dal sistema radar.

Se la geometria di osservazione risulta la stessa per le due acquisizioni, la “ ϕ_{topo} ” è uguale a zero. Tuttavia, se le due posizioni successive dell’antenna sono separate da una certa distanza B (baseline interferometrica) nel piano perpendicolare a quello di volo, diversi punti sulla superficie saranno in posizioni relative leggermente diverse rispetto all’antenna (Figura 37). Il contributo interferometrico di fase dovuto alla topografia può essere scritto come (Zebker et al., 1994; Hanssen, 2001):

$$\phi_{\text{topo}} = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda r \sin \theta} dz + \phi_{\text{terreno_piatto}} \quad (2.8)$$

dove “ λ ” è la lunghezza d’onda, “ r ” è la distanza tra il radar e un punto sulla superficie, “ θ ” è l’angolo di vista e “ dz ” è l’elevazione sopra un’altezza di riferimento.

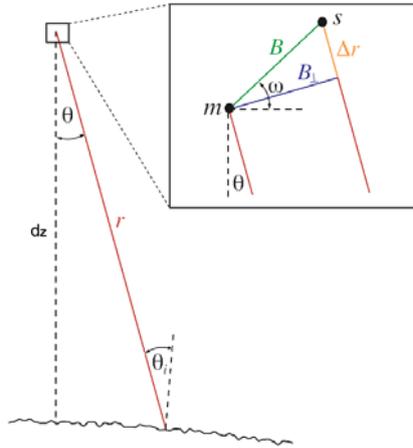


Figura 37. Imaging geometry per l’interferometria radar satellitare (Hooper, 2006).

Il sensore radar in movimento nel piano del foglio e la sua posizione all’istante di acquisizione “*master*” indicato con m e all’istante di acquisizione “*slave*” indicato con s . B è la lunghezza della baseline tra le successive posizioni del sensore, B_{\perp} è riferita alla componente perpendicolare alla baseline, r è la distanza tra il sensore e la superficie della terra, ω è l’angolo tra il vettore della baseline e l’orizzontale, θ è l’angolo di vista e θ_i l’angolo d’incidenza sulla superficie della terra, dz l’elevazione sopra un’altezza di riferimento.

Il termine “ $\phi_{\text{terreno piatto}}$ ” è un contributo deterministico della fase dovuto ad una superficie di riferimento, che per i sistemi satellitari è tipicamente l’ellissoide di riferimento. Secondo l’equazione (2.8), utilizzata per derivare carte di elevazione, il segnale topografico di fase dopo lo spostamento della superficie di riferimento è direttamente proporzionale all’altezza ed alla linea di base perpendicolare. Se si ha a disposizione un Modello di Elevazione del Terreno allora è possibile eliminare il contributo dovuto alla topografia calcolando la $\phi_{\text{topo-simulata}}$. Quest’ultima sottratta alla fase interferometrica fornisce la fase interferometrica differenziale:

$$\phi_{\text{D-Int}} = \phi_{\text{Int}} - \phi_{\text{topo}} = \phi_{\text{movimento}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{res-topo}} + \phi_{\text{noise}} \quad (2.9)$$

dove “ $\phi_{\text{res-topo}}$ ” rappresenta la componente rimanente dovuta principalmente agli errori del modello di elevazione (Figura 38).

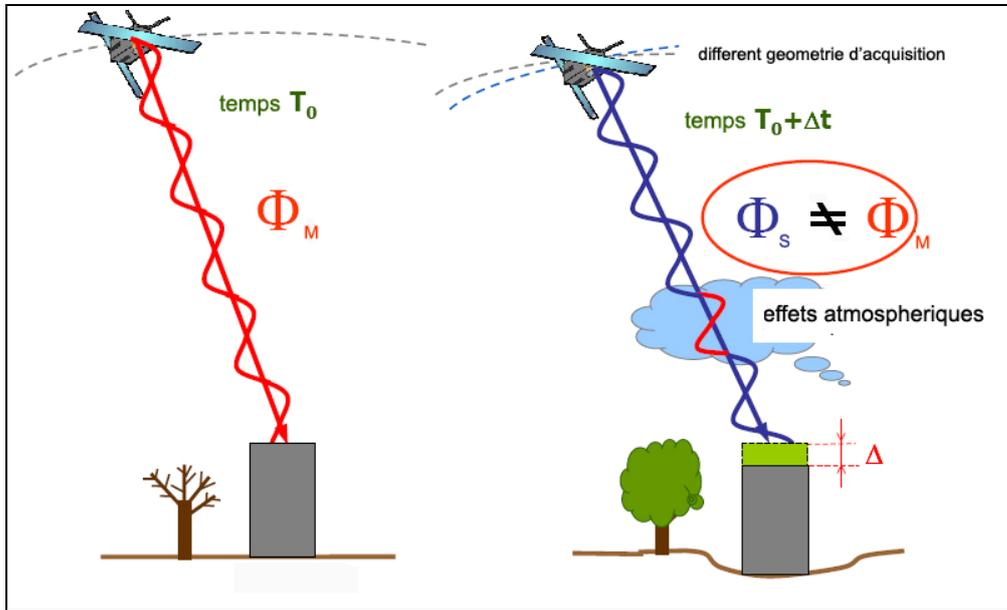


Figura 38. Approccio interferometrico : l'idea fondamentale.

2.3 Fonti di errore nelle osservazioni degli spostamenti

Per interpretare gli spostamenti misurati con le tecniche DInSAR è importante individuare e isolare gli errori che affliggono la misura. Fino alla metà degli anni '90 la maggior parte degli studi concentrati sull'applicabilità di questa tecnica davano generalmente per sicura l'affidabilità della misura. Al contrario, nei lavori più recenti, si cerca di comprendere meglio gli errori contenuti soprattutto nelle misure interferometriche di fase. Di seguito, si descrivono brevemente le fonti di errore più importanti e le loro implicazioni nelle misure di precisione degli spostamenti di superficie. I prossimi paragrafi non sono certamente esaustivi ed il lettore interessato potrà trovare una completa trattazione dell'argomento in Hanssen (2001). Alla stessa si è fatto principalmente riferimento per la redazione di questa sezione.

Gran parte degli errori nelle misure di deformazione non sono dovuti a una misura imprecisa della fase interferometrica. Piuttosto, essi derivano dagli errori che legano la fase interferometrica ai diversi contributi del segnale: topografia, deformazioni, atmosfera e cambiamenti delle proprietà di rifrazione della superficie investigata. I termini più importanti che caratterizzano gli errori negli interferogrammi utilizzati per la misura degli spostamenti, come il noise e la decorrelazione della fase, gli errori orbitali, dei modelli di superficie, atmosferici e di geocodifica sono illustrati nei paragrafi seguenti.

2.3.1 Noise e decorrelazione della fase

Il noise e la decorrelazione della fase costituiscono le limitazioni più importanti alla misura interferometrica. Come tutte le tecniche interferometriche, l'interferometria radar si basa sulla concordanza dei segnali impiegati per creare i modelli d'interferenza. I segnali incoerenti non possono essere impiegati per una misura interferometrica. Diversi effetti riducono la concordanza del segnale tra le due acquisizioni SAR utilizzate per formare un interferogramma. Normalmente, esse sono considerate in termini di correlazione tra le due immagini, definite come nella 2.9:

$$\gamma = \frac{\langle Z_1 Z_2^* \rangle}{\sqrt{\langle Z_1 Z_1^* \rangle \cdot \langle Z_2 Z_2^* \rangle}} \quad (2.10)$$

Dove $\langle \rangle$ individua il valore previsto e Z e Z^* sono rispettivamente i valori complessi dell'immagine e il suo complesso coniugato. Negli interferogrammi il valore di correlazione γ è

calcolato su un piccolo campione di pixel intorno ad un determinato punto. Per definizione (2.2) i valori assoluti di γ sono compresi tra 0 e 1. Un valore di correlazione pari a 1 corrisponde alla concordanza perfetta di fase tra i due segnali. Valori di correlazione più piccoli dell'unità corrispondono a una concordanza ridotta della fase che ha come conseguenza una misura disturbata della differenza di fase calcolata nell'interferogramma. Un valore di correlazione nullo indica una differenza di fase "senza significato". Questo limite inferiore teorico non è abitualmente raggiunto e interferogrammi con correlazioni al disotto di circa 0.3 o 0.4 rappresentano condizioni limite per l'utilizzo dell'interferometria convenzionale. Il limite di correlazione nell'equazione (2.9) può essere scritto come risultato dei differenti termini che causano la decorrelazione dei segnali radar (Zebker e Villasenor, 1992).

$$\gamma = \gamma_{termico} \cdot \gamma_{spaziale} \cdot \gamma_{temporale} \quad (2.11)$$

Una discussione più completa potrebbe ugualmente includere termini di decorrelazione che derivano direttamente dal processamento e/o agli effetti dei diversi centroidi Doppler, che possono introdurre ulteriori piccoli addizionali elementi nelle successive interpolazioni (Hanssen, 2001). - La decorrelazione termica è dovuta al noise del sistema e può essere approssimativamente connessa al rapporto segnale/rumore (SNR) del sistema radar (Zebker e Villasenor, 1992):

$$\gamma_{termico} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (2.12)$$

Per un SNR relativamente alto, il $\gamma_{termico}$ è vicino all'unità.

- La decorrelazione spaziale si produce fondamentalmente se la linea di base interferometrica, cioè la separazione spaziale dei sensori non è esattamente uguale a zero. Siccome il segnale ricevuto dal sensore è la somma coerente dei segnali retrodiffusi, questi contributi si aggiungono in modo leggermente diverso se visti da un angolo diverso, riducendo la coerenza del segnale. La decorrelazione spaziale include gli effetti di un angolo di ripresa leggermente diverso dovuto ad una linea di base perpendicolare non uguale a zero ed a orbite non precisamente parallele.

Se la "retrodiffusione volumetrica" e gli effetti della deformazione possono essere considerati trascurabili, e le orbite sono parallele, il fattore spaziale di correlazione (Zebker e Villasenor, 1992) può essere scritto:

$$\gamma_{spaziale} = 1 - \frac{2 |B_{\perp}| R_y \cos \theta}{\lambda r} \quad (2.13)$$

dove “ B_{\perp} ” è la baseline perpendicolare, “ R_y ” è la risoluzione in range, “ θ ” è l’angolo di vista tra le due antenne, “ λ ” è la lunghezza d’onda e “ r ” la distanza tra l’antenna e ogni elemento di risoluzione della superficie. L’equazione (2.13) definisce ugualmente “ la linea di base critica ” come linea di base per la quale $\gamma_{spaziale}$ diviene uguale a zero. La diminuzione della correlazione con l’aumento della linea di base perpendicolare è inversamente proporzionale alla lunghezza d’onda del segnale. Così, l’effetto è meno importante per sensori SAR che funzionano a lunghezza d’onda più alta. La maggior parte delle immagini SAR oggi disponibili è stata acquisita in banda C ($\lambda = 0.05666$ m per ERS-1/2). Qualche satellite ha utilizzato lunghezze d’onda più corte in banda X per realizzare risoluzioni più elevate o più lunghe (L-bande $\lambda \approx 0.25$ m, per J-ERS). Le missioni SAR previste in futuro utilizzeranno anche radar in banda L, che permetteranno la formazione di interferogrammi coerenti anche con linee di base perpendicolari più lunghe di quelle normalmente oggi utilizzate.

- Le decorrelazione temporale risulta essere la più problematica da caratterizzare dal punto di vista teorico. L’effetto è dovuto ai cambiamenti della superficie riflettente tra le due acquisizioni radar. Tali cambiamenti possono essere molteplici e dovuti ai cambiamenti geometrici relativi alle foglie e/o all’erosione della superficie derivata per esempio dalle attività agricole o da cantieri. La pioggia e la neve perturbano ugualmente la riflettività della superficie. Non esistono molte sperimentazioni sulla decorrelazione temporale (Zebker e Villasenor, 1992 ; Hoen, 2001) e i risultati derivati sono estremamente legati al luogo specifico. Di conseguenza, nessuna teoria generale ne è stata derivata. Tuttavia, è stato mostrato qualitativamente che le superfici aride o semiaride, non molto vegetate e i settori urbani conservano una buona correlazione anche dopo diversi anni, mentre le zone agricole o fortemente vegetate come quelle con nevi perenni si presentano decorrelate quasi totalmente dopo giorni, (Figura 39). La decorrelazione temporale è anch’essa fortemente dipendente dalla lunghezza d’onda (Zebker e Villasenor, 1992). Interferogrammi che utilizzano dati acquisiti con lunghezza d’onda elevata (alla scala delle microonde) hanno una decorrelazione più lenta rispetto ai dati acquisiti con lunghezze d’onda più corte (Usai, 2001). Così, dove la decorrelazione temporale nei dati ERS (C-bande) ha

impedito la generazione di interferogrammi utilizzabili su lungo periodo, le future missioni in banda L potrebbero consentire risultati migliori.

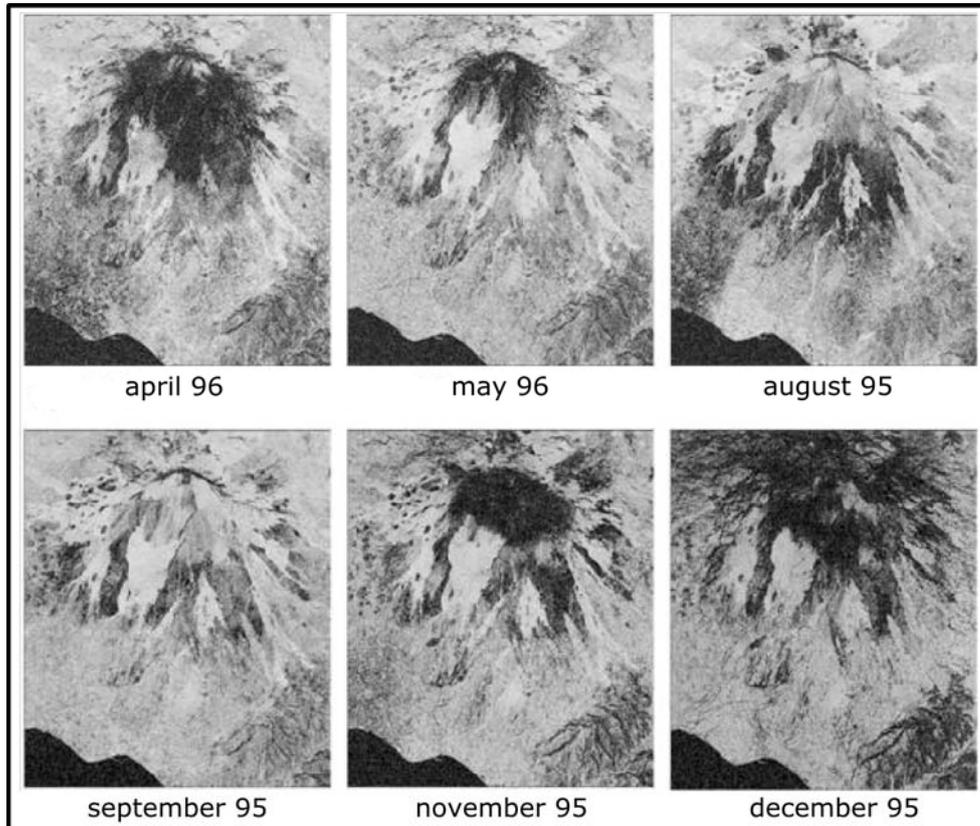


Figura 39. Decorrelazione temporale osservata sull'Etna, (da Ferretti, 1998).

In figura è mostrata una serie temporale di immagini di coerenza del monte Etna ottenute tutte da coppie d'immagini ERS-1 ed ERS-2 riprese a distanza di un giorno, ma in diversi periodi dell'anno. Da sinistra a destra e dall'alto in basso sono rappresentate le coerenze nei mesi di Aprile, Maggio, Agosto, Settembre, Novembre e Dicembre. Si noti, ad esempio, la totale incoerenza rilevata sulla cima dell'Etna nel mese di Novembre causata dalla copertura nevosa intervenuta tra la prima e la seconda osservazione.

2.3.2 Errori orbitali

La formazione di un'immagine radar è basata su una misura relativa: la distanza tra il satellite e la superficie della terra. Per cui, la conoscenza precisa della posizione del sensore non è necessaria semplicemente per formare l'immagine stessa, ma per determinare esattamente la posizione geografica dell'immagine acquisita. La conoscenza della posizione del sensore per un satellite orbitale è equivalente alla conoscenza precisa dell'orbita. Questa è data dalle effemeridi e dallo stato del vettore. Siccome un interferogramma rappresenta una misura della differenza tra due acquisizioni SAR, risulta molto importante la conoscenza precisa della posizione relativa delle due orbite perché questo dato è in forte relazione con la misura della fase interferometrica.

Questa posizione relativa è parametrizzata dalla linea di base interferometrica B , con le sue componenti parallele e perpendicolari. Poiché le orbite non sono generalmente esattamente parallele, la linea di base cambia in funzione dell'azimut (along-track location). Per orbite precise determinate a partire dalle effemeridi del satellite e del modello gravitazionale la precisione in ground range (across-track) e in direzione verticale sono rispettivamente di circa 8 e 5 centimetri (Scharroo e Visser, 1998). Si deve ricordare che i relativi errori in azimuth sono eliminati nella coregistrazione delle due immagini SAR e prima di formare l'interferogramma. Utilizzare una valutazione imprecisa della linea di base interferometrica nel processing avrà come conseguenza un contributo residuale della fase, della curvatura e della topografia di superficie oltre ad un'incorretta valutazione delle quote. Anche se in principio è possibile stimare l'errore nella linea di base a partire dalla fase residuale nell'interferogramma, nella pratica l'operazione risulta complicata dalla presenza di altri contributi di fase derivati dagli effetti atmosferici e topografici. Tuttavia, in prima approssimazione, gli errori nelle componenti della linea di base possono essere descritte da un polinomio lineare o quadratico nella direzione di range, perpendicolare alla linea di volo, (Hanssen, 2001).

2.3.3 Errori del Modello Digitale del Terreno

La generazione dei dati numerici di elevazione è stata probabilmente l'applicazione più importante ed economicamente la più riuscita della tecnica DInSAR. All'epoca in cui è stata realizzata (2000), la missione SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), ha rivoluzionato la disponibilità di dati topografici di qualità. Tuttavia, per gli studi di deformazione, il segnale di fase relativo alla topografia deve essere normalmente eliminato prima di analizzare quella relativa alla deformazione. Ciò può essere fatto con l'utilizzo di un modello numerico di elevazione esterno (two-pass interferometry) dove solo due acquisizioni SAR sono richieste per formare e correggere un interferogramma (Massonnet et al., 1993), oppure sottraendo un segnale di fase da un secondo interferogramma che si assume contenere un segnale topografico (Zebker et al., 1994), (three o four-pass interferometry, secondo il numero di immagini SAR utilizzate). Utilizzando l'informazione topografica dell'una o l'altra fonte, il segnale di fase è calcolato utilizzando l'equazione (2.7) e sottratto dall'interferogramma. Quando un modello numerico di elevazione è utilizzato, qualsiasi errore nell'informazione di altezza sarà riportato come errore di fase nella fase topografica stimata e così nell'interferogramma. La sensibilità dell'errore di fase

all'errore di altezza del DTM è proporzionale alla baseline perpendicolare (eq. 2.7, Zebker et al, 1994). Per DTM tipici questi errori si producono principalmente a frequenze spaziali alte. Le altezze rappresentate dai Modelli Digitali del Terreno sono abitualmente le altezze sulla superficie della terra. Tuttavia, la superficie riflettente del radar può differire di diversi metri dalla superficie della terra nelle zone urbane (es. edifici) o delle zone a grande vegetazione. La differenza tra l'altezza rapportata al DTM e l'altezza del centro di retrodiffusione visto dal radar causa un errore di fase nell'interferogramma corretto. Quando i metodi "three ou four-pass" sono utilizzati per correggere la fase topografica, le fonti di errore principali sono i contributi di fase non-topografica (per esempio atmosferica o di deformazione) nell'interferogramma utilizzato per la correzione e/o gli errori nella linea di base interferometrica stimata. Se differenti interferogrammi sono combinati per correggere la topografia, l'errore di valutazione dell'elevazione può essere ridotto di circa 5 m (Ferretti et al., 1999) che ha come conseguenza un errore di fase generalmente trascurabile salvo che per le baseline perpendicolari più lunghe. La stima inesatta delle baseline perpendicolari per il calcolo della topografia o delle deformazioni avranno come conseguenza un segnale residuo di fase proporzionale alla differenza di altezza rimanenti nell'interferogramma corretto. Questo tipo di errore è abitualmente facile da individuare.

2.3.4 Errori derivati dal contributo atmosferico

Un vantaggio importante delle tecniche di telerilevamento radar rispetto a quelle ottiche è che l'energia elettromagnetica alle frequenze radar può penetrare la copertura nuvolosa, con la possibilità di generare immagini "all-weather". Tuttavia, la propagazione dei raggi elettromagnetici in un mezzo come l'atmosfera non è indipendente dal suo indice di rifrazione. Cambiamenti spaziali o temporali dell'indice di rifrazione modificano la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche, che così perturba il tempo di viaggio del segnale misurato dal sistema radar. La formazione dell'immagine SAR d'ampiezza non risulta visibilmente disturbata dagli effetti atmosferici perché le relative differenze di ritardo nell'immagine sono molto più piccole della risoluzione in "range" del sistema. Anche se segnali di ritardo atmosferico di diversi centimetri sono stati osservati negli interferogrammi (Hanssen, 2001), l'effetto è piccolo se confrontato ai diversi metri di risoluzione in "slant-range" tipiche del sistema radar. Tuttavia, le misure interferometriche risolvono differenze nei

tempi di propagazione dell'ordine di una frazione di nanosecondo tra 2 acquisizioni SAR: intervallo molto preciso per misurare cambiamenti della propagazione del ritardo atmosferico. Poiché i cambiamenti dell'indice di rifrazione, n_r , sono relativamente piccoli, queste variazioni sono tipicamente discussi in termini di rifrazione:

$$N = (n_r - 1)10^6 \quad (2.14)$$

L'incurvarsi del percorso del segnale radar dovuto alle variazioni della rifrazione atmosferica è trascurabile per tutti i dati SAR oggi disponibili (Hanssen, 2001), in modo che il segnale ritardato lungo un raggio incidente dovuto alla rifrazione atmosferica possa essere scritto come :

$$\Delta t = 10^{-6} \int_0^H \frac{N}{\cos \theta_i} dh \quad (2.15)$$

dove H è l'altezza dell'atmosfera e θ_i l'angolo d'incidenza. La rifrazione dipende dalla pressione atmosferica, dalla temperatura, dalla quantità di vapore d'acqua, dalla densità del numero di elettroni e dalla presenza di acqua allo stato liquido (Smith e Weintraub, 1953). Poiché la densità del numero di elettroni nella ionosfera cambia molto lentamente nello spazio, l'importanza degli effetti ionosferici sull'interferogramma è in generale molto meno importante rispetto agli effetti troposferici (Hanssen, 2001). Inoltre, nella gamma tipica di variabilità, la rifrazione è più sensibile ai cambiamenti di vapore d'acqua troposferico. Anche se il meccanismo fisico che disturba la propagazione delle onde radar attraverso l'atmosfera è stato intensamente studiato, è generalmente difficile correggere gli interferogrammi in cui il segnale è disturbato dal ritardo atmosferico. Una tale correzione esigerebbe la conoscenza di tutti i parametri atmosferici interessanti la rifrazione nei tempi di acquisizione delle immagini impiegate per formare gli interferogrammi. Nonostante osservazioni riguardo la pressione atmosferica, la temperatura di superficie e l'umidità relativa esterna siano spesso disponibili, generalmente, queste non sono riferibili al momento delle acquisizioni. Questi parametri possono cambiare in maniera significativa sopra la zona relativa all'interferogramma e anche verticalmente.

Principalmente, due tipi di perturbazione atmosferica sono spesso osservati negli interferogrammi radar. Il primo tipo, causando irregolarmente artefatti sulla forma di fase a diverse scale spaziali, è legato alla turbolenza atmosferica (Hanssen, 2001). Il secondo tipo è espresso come segnale residuo della fase negli interferogrammi ed è fortemente correlato alla topografia. Questo tipo di perturbazione del segnale mostra la dipendenza dell'elevazione dai cambiamenti di rifrazione negli strati atmosferici (Delacourt et al., 1998 ; Hanssen, 2001).

Poiché un approccio semplice alla correzione delle osservazioni interferometriche, in assenza di grandi volumi di dati sull'atmosfera, non è agevole, nelle applicazioni DInSAR si cerca di distinguere in modo netto i segnali atmosferici da quelli di deformazione o di topografia, per escludere i settori interessati da questi “ artefatti atmosferici ” dalle analisi successive. Un approccio comunemente utilizzato è quello di comparare differenti interferogrammi indipendenti sulla stessa zona. Assumendo i fenomeni atmosferici turbolenti come essenzialmente non correlativi, le “firme” di fase che appaiono solamente in un interferogramma probabilmente risultano prodotte da contributi atmosferici (Massonnet e Feigl, 1998). Tuttavia, se più interferogrammi sono sommati (stacked), i contributi atmosferici tendono a cancellarsi, isolando il segnale d'interesse. Questa logica può solamente essere impiegata se il processo di deformazione è temporaneamente più correlato del segnale atmosferico. Un segnale di subsidenza contenuto in un interferogramma, seguito da un segnale di sollevamento, può difficilmente essere differenziato da un effetto atmosferico.

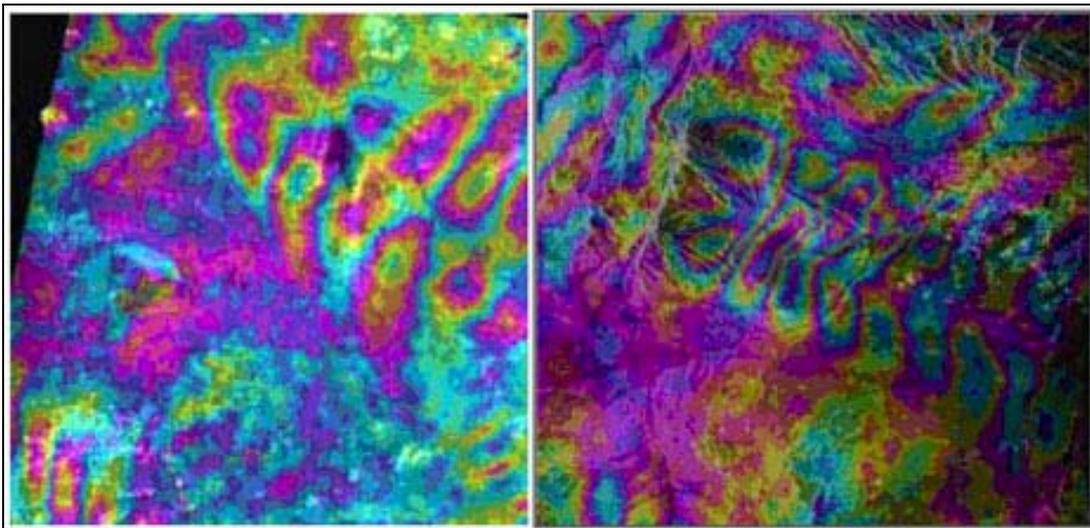


Figura 40. Due esempi di segnali atmosferici nella misura di fase DInSAR.

A) Antelope Valley, California (gennaio - maggio, 1999), **B)** Tucson, Arizona (gennaio - aprile, 1996). Perturbazioni di questo tipo sono facilmente identificate nelle immagini. Risulta molto più difficile riconoscere modelli più deboli o meno caratteristici, (Hoffmann, 2003)

Studi più recenti (Ferretti et al., 2000; Schmidt e Burgmann, 2003) comprendenti un gran numero di interferogrammi, impiegano tecniche di filtraggio temporale più raffinate fondate sulla stessa ipotesi delle caratteristiche spaziali e temporali del segnale atmosferico. Questo tipo di filtraggio può essere ottimizzato se le informazioni *a priori* sulle statistiche del processo di deformazione sono disponibili, (Ferretti et al., 2000). Un altro approccio di correzione, che si

fonda sull'informazione a priori sui limiti delle zone statisticamente in deformazione, caratterizza la correlazione spaziale del segnale atmosferico in una zona (assunta) stabile utilizzando delle misure come il variogramma. La correlazione spaziale del segnale atmosferico nel settore in deformazione permette al segnale osservato nelle zone stabili adiacenti di essere estrapolato dai settori in deformazione. Questa è una metodologia realizzabile per eliminare il segnale atmosferico in piccole zone in subsidenza, dove si può assumere che il segnale è approssimativamente stazionario, (Crippa et al., 2003).

2.3.5 Proiezione dello spostamento

Anche se non rappresenta un errore di misura nel senso stretto, un problema si può presentare interpretando le osservazioni del radar in “line-of-sight” (LOS) come quantità tridimensionale. Il problema si presenta perché DInSAR può solamente misurare una componente del campo di spostamento generalmente invece tridimensionale. Sfortunatamente questa direzione, lungo la “LOS” del radar, talvolta non porta ad un significato fisico nei processi di deformazione. Dove la proiezione degli spostamenti orizzontali nella LOS radar è significativa, supporre che il segnale misurato è provocato da spostamenti puramente verticali presenterà degli errori. Considerando l'angolo d'incidenza per i dati ERS, la sensibilità delle misure di LOS con spostamenti orizzontali è circa pari al 42% di quella degli spostamenti verticali (Allievi et al., 2002).

ESPOSIZIONE	PENDENZA		NOTE
	Dati sat. ascendenti	Dati sat. discendenti	
Pendenza esposta a Est	Miglioramento della risoluzione in <i>ground range</i> se $ \alpha < 67^\circ$ Pendenze in ombra se $ \alpha > 67^\circ$	Deformazioni geometriche (<i>foreshortening</i> se $ \alpha < 23^\circ$ <i>layover</i> se $ \alpha > 23^\circ$)	Solamente i dati ascendenti sono adatti alla misura. I versanti con inclinazione maggiore di 67° non sono coperti. Dati di deformazione 1D lungo la LOS.
Pendenza esposta a Ovest	Deformazioni geometriche (<i>foreshortening</i> se $ \alpha < 23^\circ$ <i>layover</i> se $ \alpha > 23^\circ$)	Miglioramento della risoluzione in <i>ground range</i> se $ \alpha < 67^\circ$ Pendenze in ombra se $ \alpha > 67^\circ$	Solamente i dati discendenti sono adatti alla misura. I versanti con inclinazione maggiore di 67° non sono coperti. Dati di deformazione 1D lungo la LOS.
Pendenze esposte a Nord o Sud	–	–	Sia i dati ascendenti che quelli discendenti sono adatti alle misure interferometriche. Combinando i risultati è possibile un'analisi della deformazione in 2D. La sensibilità del sistema a movimenti traslazionali (direzione Nord-Sud) è molto debole.

Tabella 2.1. Effetti dell'esposizione e della pendenza del rilievo sulle immagini SAR è impatto sulla fattibilità dell'analisi interferometrica. Si definisce *grounde range* la proiezione a terra della congiungente satellite-bersaglio (LOS – Line of sight), (Allievi et al., 2002, modificata).

2.4 Conclusioni

Si è potuto verificare l'esistenza di diversi fattori che fanno della tecnica DInSAR uno strumento appropriato di misura delle deformazioni della superficie terrestre:

- > In condizioni ottimali si può raggiungere la sensibilità millimetrica sui valori della deformazione ;
- > Le immagini ricoprono vaste zone del territorio, fino a 400x400 Km (Wide Swath Mode), con una buona risoluzione spaziale (pixel di 20x20 m);
- > Sono a disposizione lunghe serie temporali di immagini che ricoprono un arco temporale maggiore di 15 anni da cui deriva la possibilità di uno studio pregresso delle deformazioni.

Tuttavia per ottenere una buona misura si devono applicare procedure numeriche che comprendono un'alta complessità gestionale. La variazione di fase tra pixel corrispondenti costituisce uno strumento capace di misurare l'eventuale deformazione di superficie del bersaglio radar, ma questo è possibile a condizione che il contributo della fase introdotto dal fenomeno di “ *diffusione* ” sia lo stesso nelle due immagini, in modo che possa annullarsi nel calcolo della differenza tra le due fasi: *ipotesi fondamentale dell'interferometria*.

Le principali cause che compromettono localmente la qualità delle misure interferometriche e di conseguenza limitano l'applicabilità della tecnica, sono legati ai fenomeni di decorrelazione. Queste si manifestano come noise sovrapposto alla fase interferometrica limitando la completa applicabilità dell'interferometria.

1. In particolare, l'eventuale variazione delle reciproche posizioni o caratteristiche elettromagnetiche dei diffusori elementari si traduce in un contributo che non si cancella durante la generazione dell'interferogramma: si parla di DECORRELAZIONE TEMPORALE. Analogamente, la distanza tra le orbite relative alla coppia d'immagini si traduce in una variazione delle distanze differenziali tra il sensore e i diffusori elementari che introduce, a sua volta, un contributo alla fase interferometrica: DECORRELAZIONE GEOMETRICA;

2. La propagazione attraverso l'atmosfera introduce un termine supplementare che, nella misura in cui le condizioni atmosferiche (particolarmente la distribuzione spaziale e la concentrazione del vapore d'acqua) delle due immagini sono differenti, si traduce in un contributo addizionale alla fase interferometrica. Il contributo atmosferico di fase si manifesterà con un termine a bassa

frequenza spaziale, spesso difficilmente distinguibile da eventuali fenomeni di deformazione che interessano zone vaste;

3. Nel caso del monitoraggio di fenomeni di deformazione che si verificano su versanti, anche l'orientazione e l'inclinazione del suolo sono dei parametri geometrici chiave. Questi influiscono sulle dimensioni delle celle di campionamento (deformazioni di prospettiva) e hanno un forte impatto sulla decorrelazione geometrica. I versanti rivolti verso il satellite vedono diminuire la risoluzione (il campionamento in direzione ground range può passare da 20-30 a centinaia di metri): l'informazione di fase non è generalmente più utilizzabile. Al contrario, le zone dell'immagine rivolte in direzione opposta al satellite sono a risoluzione più elevata (e a campionamento più fitto), la decorrelazione geometrica è ridotta e l'informazione di fase è migliore;

4. Un sistema radar è in grado di discriminare fenomeni di deformazione solamente lungo la congiungente satellite-bersaglio (*Line-of-Sight*, LOS). Tutti i satelliti SAR attualmente in funzione sono su orbite quasi polari e illuminano il suolo con angoli di incidenza approssimativamente tra i 20 e i 50°. Di conseguenza la sensibilità del sistema è buona (o media) per componenti di deformazioni verticali o in direzione Est-Ovest, mentre è solamente discreta per effetto di movimenti in direzione Nord- Sud.

Senza dubbio, nello scenario italiano, il fattore più determinante tra quelli analizzati e la decorrelazione temporale introdotta dalla copertura vegetale.

Capitolo 3. Aree di studio selezionate. Caratteristiche, dissesti, dati SAR disponibili.

Questo capitolo illustra l'interesse delle aree scelte per lo studio. Sono introdotti brevemente il quadro geologico e geomorfologico in cui sono collocati i fenomeni analizzati. La presentazione è forzatamente breve poiché una loro analisi approfondita non rientra nello scopo principale di questo lavoro. Inoltre bisogna considerare che la possibilità di recuperare dati bibliografici geologico-geotecnico-ambientali necessari come base di partenza per la caratterizzazione preliminare del territorio, ha messo immediatamente in evidenza che, ad oggi, per l'area, non è disponibile adeguato materiale scientifico.

Saranno presentate di seguito le scelte adottate riguardo alla zona di studio, i dati disponibili relativi ai dissesti catalogati e quelli scelti per l'analisi interferometrica sottolineando i problemi operativi esistenti.

3.1 Scelta della zona di studio.

Si è provveduto a selezionare le aree ritenute maggiormente interessanti sia per l'applicazione della metodologia di analisi sia per le ricadute in termini di valutazione del rischio. La scelta ha riguardato le zone urbane e l'hinterland delle cittadine di “ *Vibo Valentia* ” e “ *Lamezia Terme* ” e sulla rete infrastrutturale presente nell'area: la linea ferroviaria “ *Tirrena Inferiore* ”, l'autostrada “ *A3 Salerno - Reggio Calabria* ” e l'aeroporto “ *Sant'Eufemia* ”. La scelta è stata dettata dalle loro singolarità e dal loro interesse specifico :

- “ *l'hinterland lametino* ” è considerato una zona strategicamente molto importante per l'intera regione calabrese. Oltre al considerevole sviluppo urbano ed industriale degli ultimi anni, la “ *Piana di Lamezia* ” è sede delle più importanti infrastrutture regionali di trasporto. L'area è situata sul margine settentrionale del “Graben de Catanzaro” (Casmez, 1967) dove esistono elementi di tettonica attiva (Gullà et al., 2005) che sembrano indurre fenomeni di subsidenza generalizzata (Guerra, 1984);

- la “ *zona del vibonese* ”, anch’essa sede di importanti infrastrutture, è saltata alle cronache per la recente inondazione del Luglio del 2006. Ciò ha messo in evidenza l’estrema fragilità di un territorio su cui la pianificazione territoriale non è stata sufficiente. In particolare la città di Vibo Valentia si è sviluppata su un horst (Casmez, 1967) dove il sollevamento neotettonico regionale, iniziato nel tardo Pleistocene ed attivo ancora oggi (Sorriso-Valvo et al. 1996; Tortorici et al., 2003), insieme a particolari condizioni litologiche, ha certamente accelerato i processi di smantellamento dei versanti, favorendo lo sviluppo di una franosità diffusa sia superficiale che profonda (Sorriso-Valvo et al. 1996; Guerricchio, 2000).

3.2 Caratteristiche geologiche e geomorfologiche generali.

Le aree oggetto della ricerca sono collocate nell'area centro meridionale della Calabria comprendente il territorio che si affaccia sul “*Golfo di Sant'Eufemia*”, tra la parte più occidentale della “*Stretta di Catanzaro*” fino alla “*penisola di Capo Vaticano*” confinando a Est con il “*Massiccio delle Serre*”.

La zona ricade nel contesto geologico regionale dell'*Arco Calabro-Peloritano*. Questo rappresenta un elemento di congiunzione, di età Eocene-Tortoniano, tra l'orogene appenninico e la Catena Siculo-Maghrebide (Amodio-Morelli et al., 1976). La sua struttura è caratterizzata dalla sovrapposizione tettonica di unità ad affinità Alpina (Complesso Calabride auct.) sui domini carbonatici di dominio africano (Amodio Morelli et al., 1976; Scandone, 1979; Rossetti et al., 2001). In particolare, le unità cristallino-metamorfiche dell'Arco Calabro, a partire dal Cretaceo Medio-Paleogene, sono sovrascorse sui domini oceanici rappresentati in affioramento dai terreni del Complesso Liguride (Knott, 1987; Ogniben, 1973) e, a partire dal Miocene Medio, l'intero edificio orogenetico sovrascorre sui domini di Piattaforma carbonatica dell'Appennino (Figura 41)

L'edificio di catena migra, a partire dal Tortoniano, verso SE lungo due svincoli di rilevanza regionale: la Linea Salina-Taormina-Scarpata di Malta, a Sud, e la Linea del Pollino, a Nord (Amodio Morelli et al., 1976; Tortorici, 1982; Monaco e Tansi, 1992; Dewey et al., 1989; Knott & Turco, 1991; Cello et al., 2000).

Dal Tortoniano in poi, questo settore di orogene assume una configurazione paleotettonica caratterizzata dalla presenza, da Ovest verso Est di:

- un bacino in forte estensione (bacino tirrenico) caratterizzato da fenomeni di rifting fino alla quasi oceanizzazione (Scandone, 1979);
- una Catena (Arco Calabro) nella quale i fenomeni di thrusting migrano da NW verso SE e sono sostituiti, nei settori interni dell'Arco, dalle strutture distensive connesse con il rifting tirrenico (Tortorici, 1982; Moussat et al., 1986; Moretti e Guerra, 1997; Turco e Malito, 1988; Turco et al., 1990; Rossetti et al., 2001).

Durante il tardo Pliocene – primo Quaternario, all'interno dell'Arco Calabro si formano faglie normali longitudinali e trasversali (Ghisetti, 1979). In particolare, nel settore interno della Calabria si forma un sistema estensionale parallelo al fronte orogenetico e legato ai processi

estensionali tirrenici. Tale sistema di faglie è noto in letteratura come Calabro-Sicula rift zone (Monaco et al., 2000). Queste faglie, di lunghezza compresa tra i 10 e i 45 Km, sono responsabili della frammentazione dell'Arco in alti strutturali e bacini sedimentati marini (Ghisetti, 1979; Tansi et al., 1998), (Figura 42).

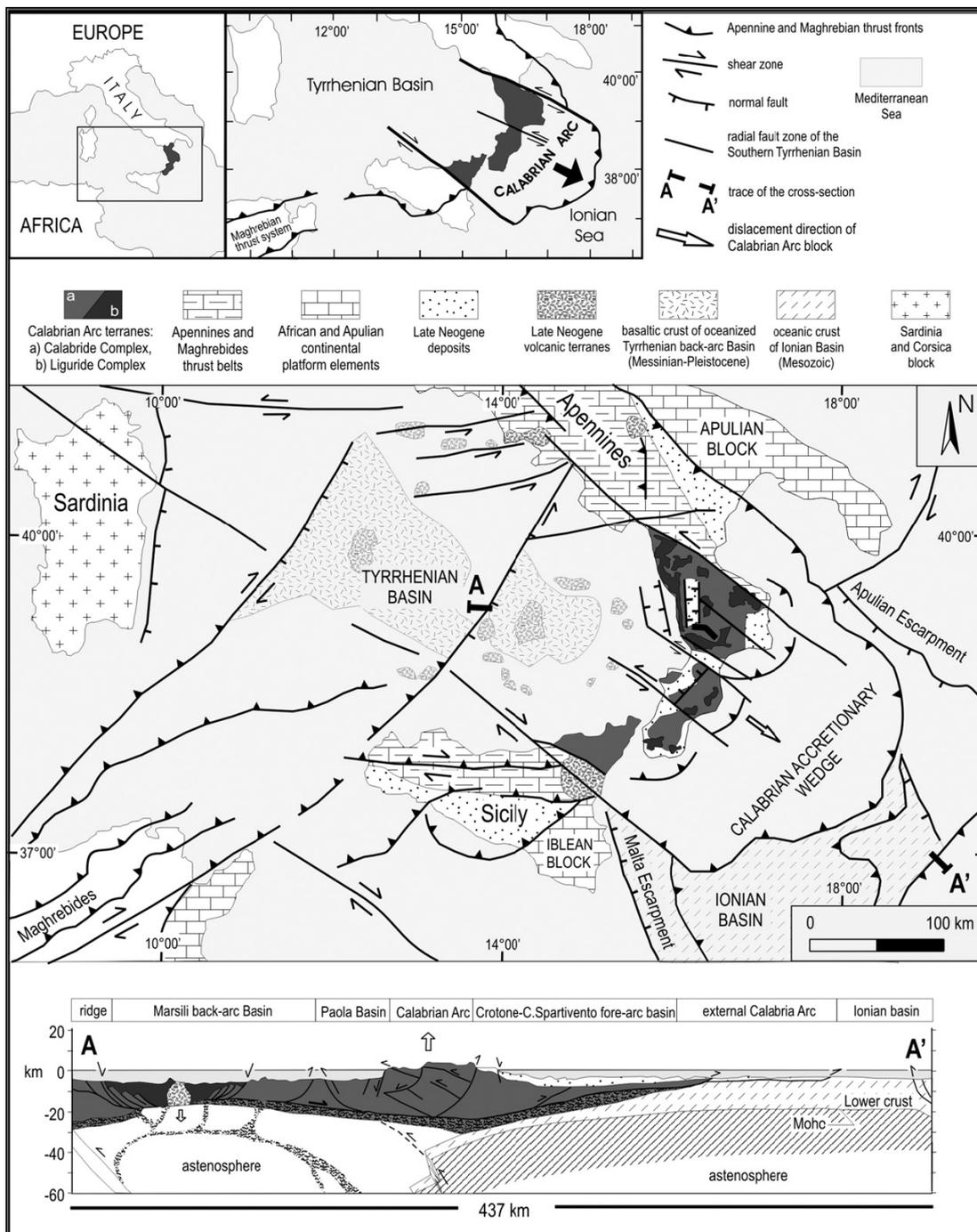


Figura 41. Mappa Geologica schematica del settore mediterraneo centrale.

È illustrato il contesto geologico regionale dell'Arco Calabro-Peloritano. Nella sezione geologica è evidenziato l'Arco Calabro in sollevamento (modificata da Van Dijk e Scheepers, 1995; Van Dijk et al., 2000).

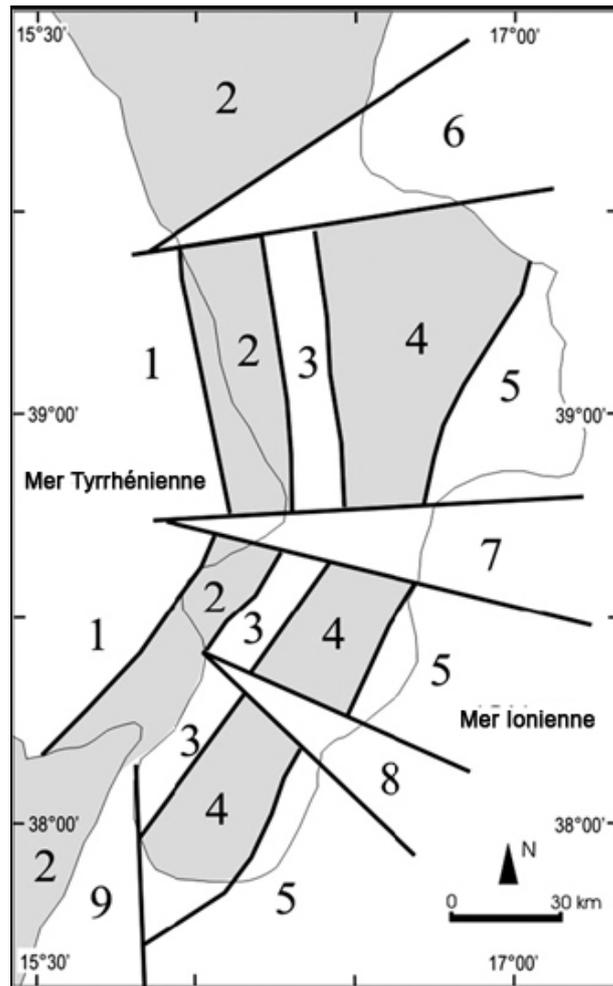


Figura 42. Segmentazione a blocchi dell'Arco Calabro nel tardo Pliocene - Quaternario.

Le linee nere indicano le faglie principali. (1) Bacino peri-Tirreniano di Paola e di Gioia Tauro ; (2) massiccio del Pollino, Catena Costiera, alti strutturali di Capo Vaticano e dei Peloritani; (3) bacino del Crati e del Mesima ; (4) alti della Sila, delle Serre e dell'Aspromonte ; (5) bacini peri-Ioniani di Crotona e di Capo Spartivento ; (6) bacino di Sibari ; (7) bacino di Catanzaro ; (8) bacino di Siderno ; (9) bacino di Messina (modificata da Ghisetti, 1979).

Tali faglie, spesso mostrano scarpate ben sviluppate e con un discreto grado di “freschezza morfologica”, sollevando e delimitando i fronti dei principali sistemi montuosi : Aspromonte, Catena Costiera, Sila e le Serre, (Gullà et al., 2005).

Sia il sistema di faglie a orientazione trasversale che quello longitudinale della *rift-zone* (Monaco et al., 2000) rivestono un ruolo particolarmente importante nella zona di studio. Il primo ha determinato la depressione tettonica (graben) che corrisponde alla “*Stretta di Catanzaro*”, a Ovest della quale è situata la città di Lamezia Terme mentre il secondo ha portato all'isolamento del “*Promontorio di Capo Vaticano*” dove è collocata la città di Vibo Valentia, (Figura 43).

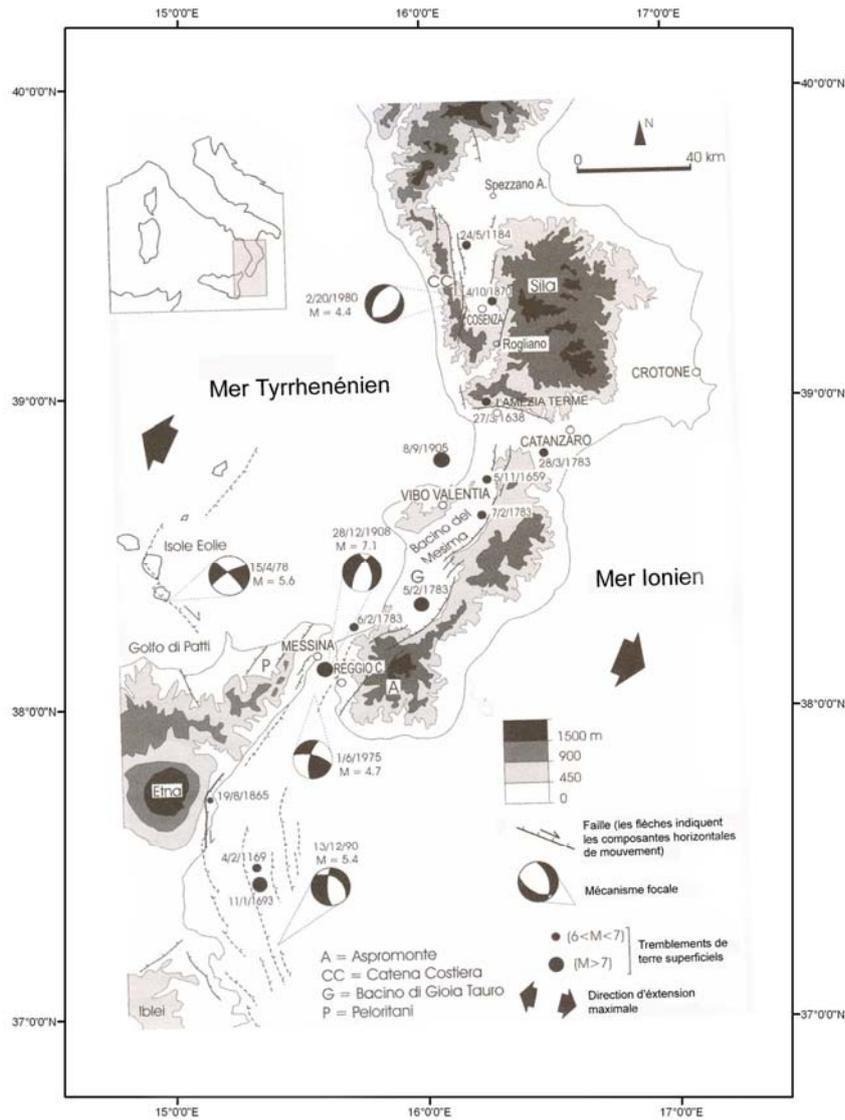


Figura 43. Caratteristiche sismo-tettoniche della “rift-zone siculo-calabra ” (modificata da Monaco et al., 2000). Sismi crostali - profondità < 35 km, (dati derivati da: Postpischl, 1985; Boschi et al., 1995).

3.2.1 L’hinterland del lametino.

Lamezia Terme è un comune di circa 70.000 abitanti in provincia di Catanzaro. È la terza città della Calabria e la più grande che si affaccia sul Mar Tirreno nei 500 Km che separano Salerno da Reggio Calabria. Esso è formalmente un agglomerato assai recente, ma in realtà nasce in epoca molto antica. Ufficialmente è stato fondato il 4 gennaio 1968, dall’unione di 3 grossi centri abitati, che nel passato costituivano comuni indipendenti (Nicastro, Sambiase, Sant’Eufemia Lamezia) e che ora sono considerati dei veri e propri quartieri (Figura 44).

Nel conteso regionale, la città si trova in posizione centrale, a breve distanza dai capoluoghi di provincia della regione. Il comune comprende una serie di piccole frazioni geografiche sulle colline adiacenti e 8 Km di costa situati nel cuore del *Golfo di Sant'Eufemia*. Una parte importante della stessa si estende sulla Piana omonima, formatasi a seguito di bonifiche di aree paludose.

Inquadramento geologico e geomorfologico generale

Il recente sviluppo urbano della città di “*Lamezia Terme*” ha trovato posto sulle “conoidi di Nicastro”, (Gullà et al., 2005), immediatamente a Sud della faglia che costituisce il margine settentrionale della “*Stretta di Catanzaro*”. Essa rappresenta una depressione tettonica, colmata da depositi Plio-Quaternari, denominata “*Graben di Catanzaro*” (Tansi et al, 1998), (Figura 45, Figura 46). La depressione è strutturata da faglie sub-verticali (ONO-ESE) con cinematica generalmente di tipo normale, con componente di trascorrenza sinistra, (Gullà et al., 2005). Il graben risulta interposto tra i contrafforti più meridionali del sistema “*Catena Costiera - Altopiano Silano*” a nord, e dalle propaggini più settentrionali del “*Massiccio delle Serre*” a sud. A nord e lungo il bordo del “*Graben di Catanzaro*”, la faglia “*Gizzeria-Nicastro-Pianopoli-Marcellinara*” (LFC in Figura 46) rappresenta l’elemento tettonico più importante e mette a contatto le formazioni cristallino-metamorfiche del sistema “*Catena Costiera – Sila*” ai depositi plio-quaternari (Figura 46), (Tansi et al., 2007). I tratti occidentali della scarpata di questa faglia sono marcati da conoidi di deiezione di dimensioni considerevoli (conoide di Nicastro) che ricoprono i depositi di terrazzo, (Gullà et al., 2005). Il territorio della zona “*lametina*” si presenta morfologicamente molto diversificato, passando da zone di bassa montagna a aree collinari, alla vasta piana alluvionale e finalmente alla costa. Il paesaggio collinare è inciso da una serie di corsi d’acqua subparalleli. Questi hanno determinato un’intensa attività erosiva accompagnata da un considerevole trasporto solido verso le zone pedemontane, con conseguente formazione di vaste conoidi di deiezione (Figura 47, Figura 48). La spinta azione erosiva esercitata dai corsi d’acqua rappresenta uno dei fattori morfo-evolutivi più importanti dell’hinterland *lametino*. L’erosione del letto e delle sponde produce una diffusa condizione d’instabilità ai piedi dei versanti ripidi, coperti da strati detritici dotati d’insufficiente resistenza meccanica e interessati da precarie condizioni di stabilità (Gaccione, 2001; Iencarelli, 2001).

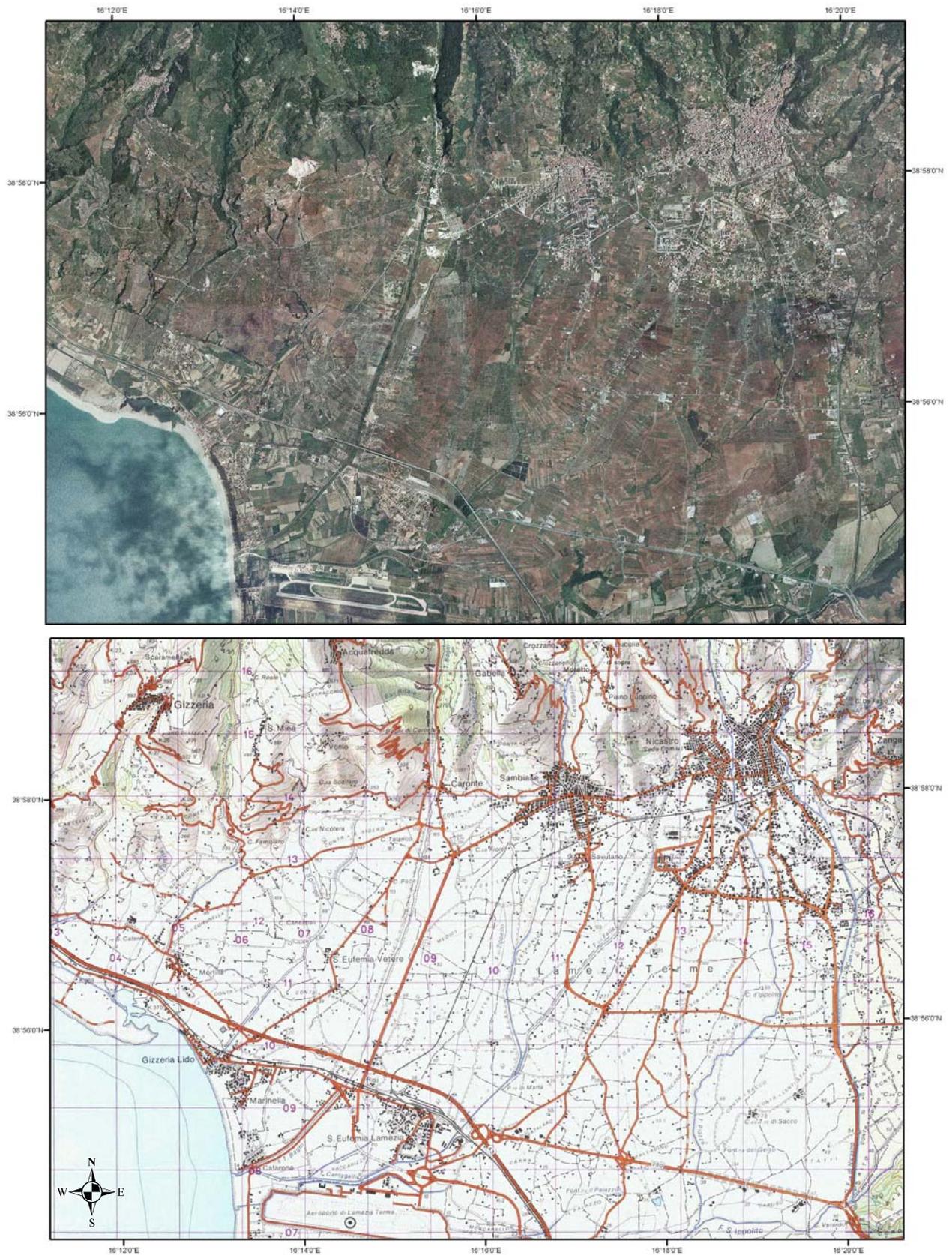


Figura 44. Foto aerea e carta topografica della città e l'hinterland di Lamezia Terme.

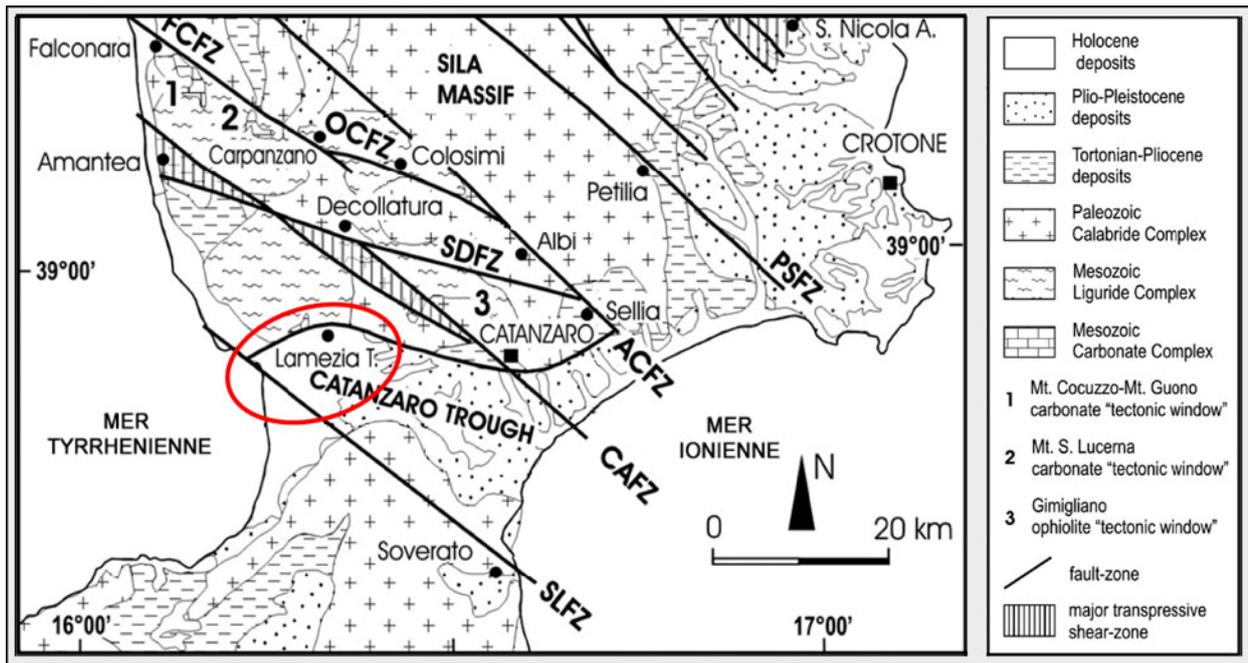


Figura 45. Carta tettonica schematica della Calabria Centrale, (modificata da Van Dijk e altri, 2000).

Sono mostrate le principali faglie trascorrenti sinistre del Miocene medio – Pleistocene. (SLFZ) Zona di faglia Soverato-Lamezia ; (CAFZ) Zona di faglia Catanzaro-Amantea ; (ACFZ) Zona di faglia Albi-Cosenza ; (SDFZ) Zona di faglia Sellia-Decollatura ; (OCFZ) Zona di faglia Ospedale-Colosimi ; (FCFZ) Zona di faglia Falconara-Carpanzano; (PSFZ) Faglia Petilia-S.Sosti; (SRFZ) Zona di faglia S. Nicola-Rossano. L'ovale in rosso indica in settore concernente la città e l'hinterland di Lamezia Terme.

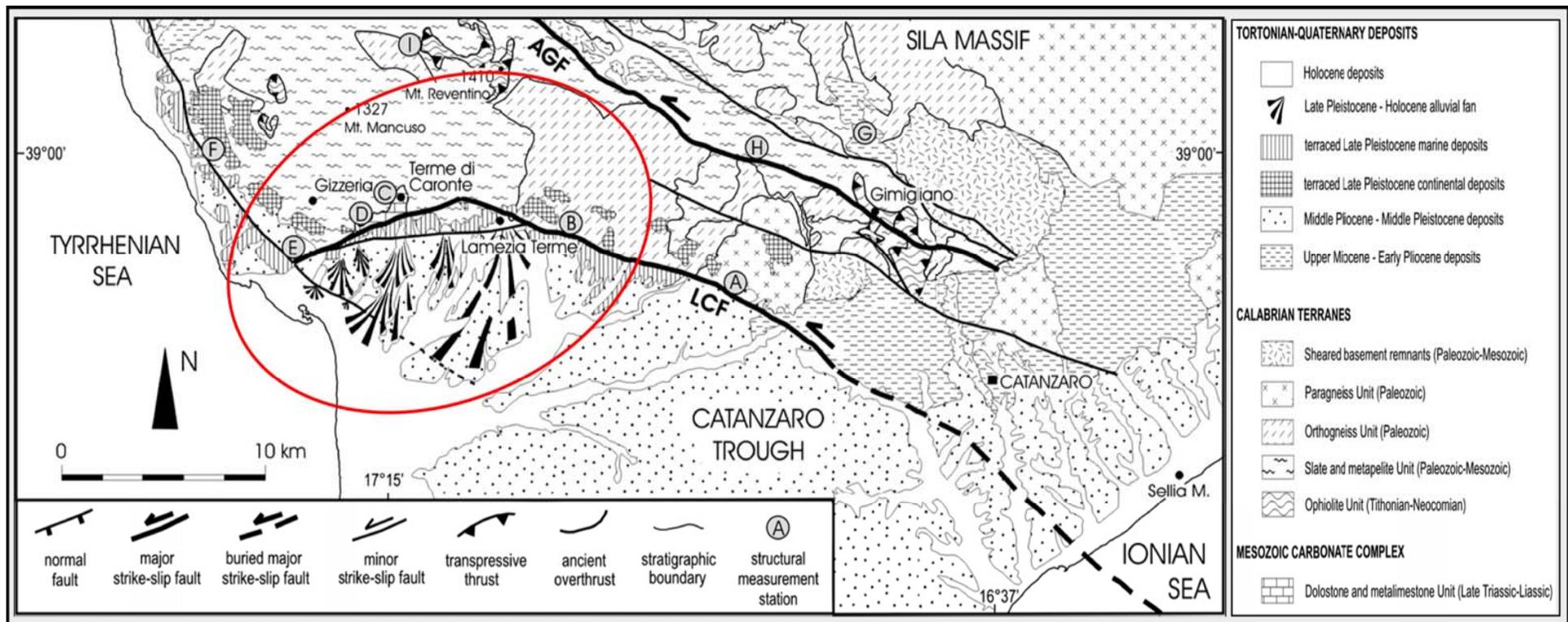


Figura 46. Carta strutturale relativa all'area del lametino, (modificata da Tansi et al., 2007). (LCF) Faglia di Lamezia-Catanzaro. L'ovale in rosso indica il settore concernente la città e l'hinterland di Lamezia Terme.

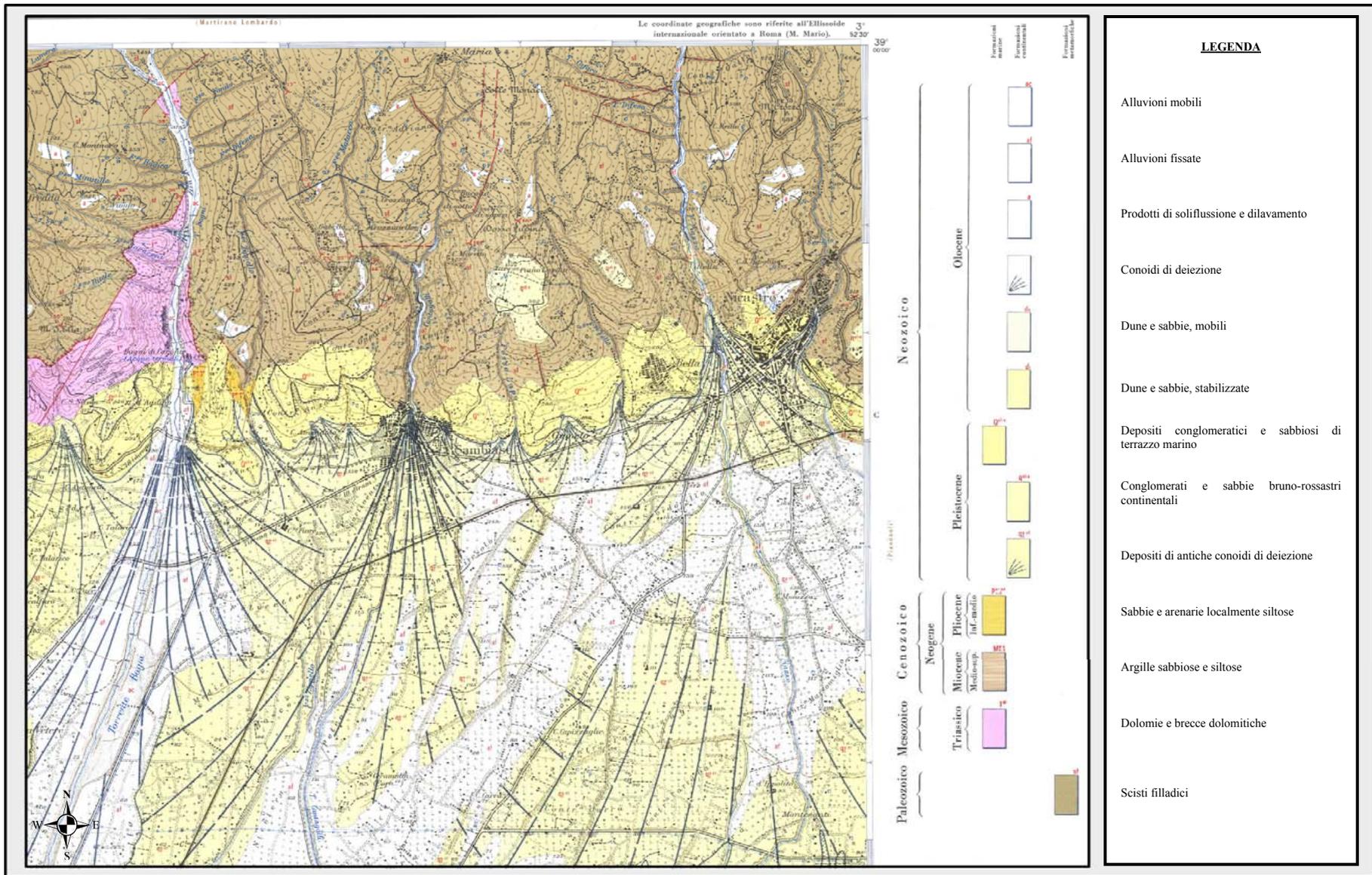


Figura 47. Carta geologica della città e l'hinterland di Lamezia Terme (Casmez, 1967).

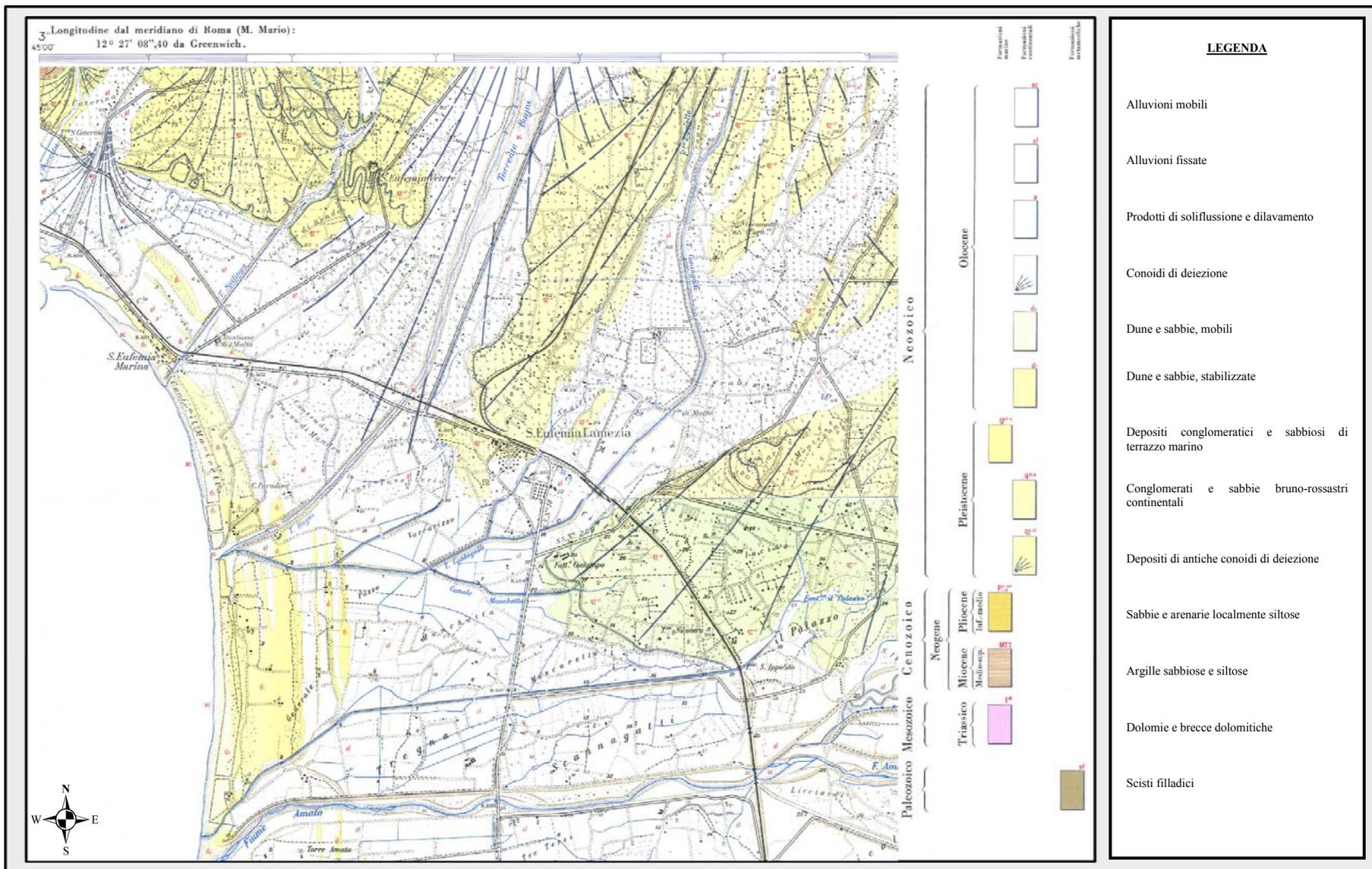


Figura 48. Carta geologica dell'hinterland di Sant'Eufemia di Lamezia Terme (Casmez, 1967).

3.2.2 Il territorio del “*vibonese*”.

Vibo Valentia (fino al 1927 Monteleone di Calabria) è un comune di circa 34.000 abitanti e capoluogo dell'omonima provincia. Il suo territorio si estende a partire dalla culminazione topografica delle “Serre” fino al mare con un dislivello massimo di poco superiore ai 1423 m (*Monte Pecoraro*), (Figura 49). Di origini molto antiche (VII secolo a.C.), attualmente la città occupa una posizione particolare nella parte più settentrionale della *Penisola di Capo Vaticano*.

Inquadramento geologico e geomorfologico generale

I terreni affioranti sono costituiti dalle unità cristallino metamorfiche dell'Arco Calabro e dalla sequenza sedimentaria trasgressiva Neogenico-Quaternaria. Più in dettaglio i “*Complessi cristallino metamorfici*” costituiscono la porzione centrale della zona e del promontorio costiero del “*Monte Poro*”, a partire da Vibo Valentia fino a “*Capo Vaticano*”. A questi sono interposti, all'interno di un graben Plio-Quaternario bordato da strutture attive, terreni di origine sedimentaria sui quali si apre la vasta vallate del fiume “*Mesima*” (Tortorici, 2003), (Figura 50). I complessi sedimentari datano dal Miocene superiore al Pleistocene e raggiungono gli spessori maggiori (>350 m, Carta Geologica della Calabria 1:25.000) nell'asse della valle del fiume “*Mesima*”, dove la successione mio-pliocenica è quasi completa. Nell'area è evidente una tettonica di tipo distensivo legata probabilmente al sollevamento Plio-Quaternario della zona, anche in relazione all'attività, ancora in corso, delle strutture tettoniche. Da Ghisetti (1979), Galli e Bosi (2002), Tortorici (2003), possono essere ripresi i seguenti punti :

- nel Pliocene medio-inferiore una fase tettonica compressiva accentua il dislivello tra la valle del fiume Mesima e gli horst marginali delle Serre e del Poro che tendono al sollevamento;
- nel Pliocene superiore-Pleistocene, sistemi di faglie normali a predominante direzione NE-SO, ONO-ESE ed E-O guidano un più generalizzato sollevamento della zona Serre-Poro ;
- in tutto il Pleistocene, il sollevamento del massiccio del M. Poro e della Catena delle Serre è fortemente asimmetrico, con velocità variabili tra 0.03 e 0.8 mm/a, confrontando i dati per tre intervalli cronologici rispettivamente 1.5 - 0.7 - 0.2 M.A, durante i quali il sollevamento della Valle del Mesima si mantiene sostanzialmente uniforme (Tortorici et al., 2003);
- il sistema di faglie che guida il sollevamento presenta sempre cinematica normale.

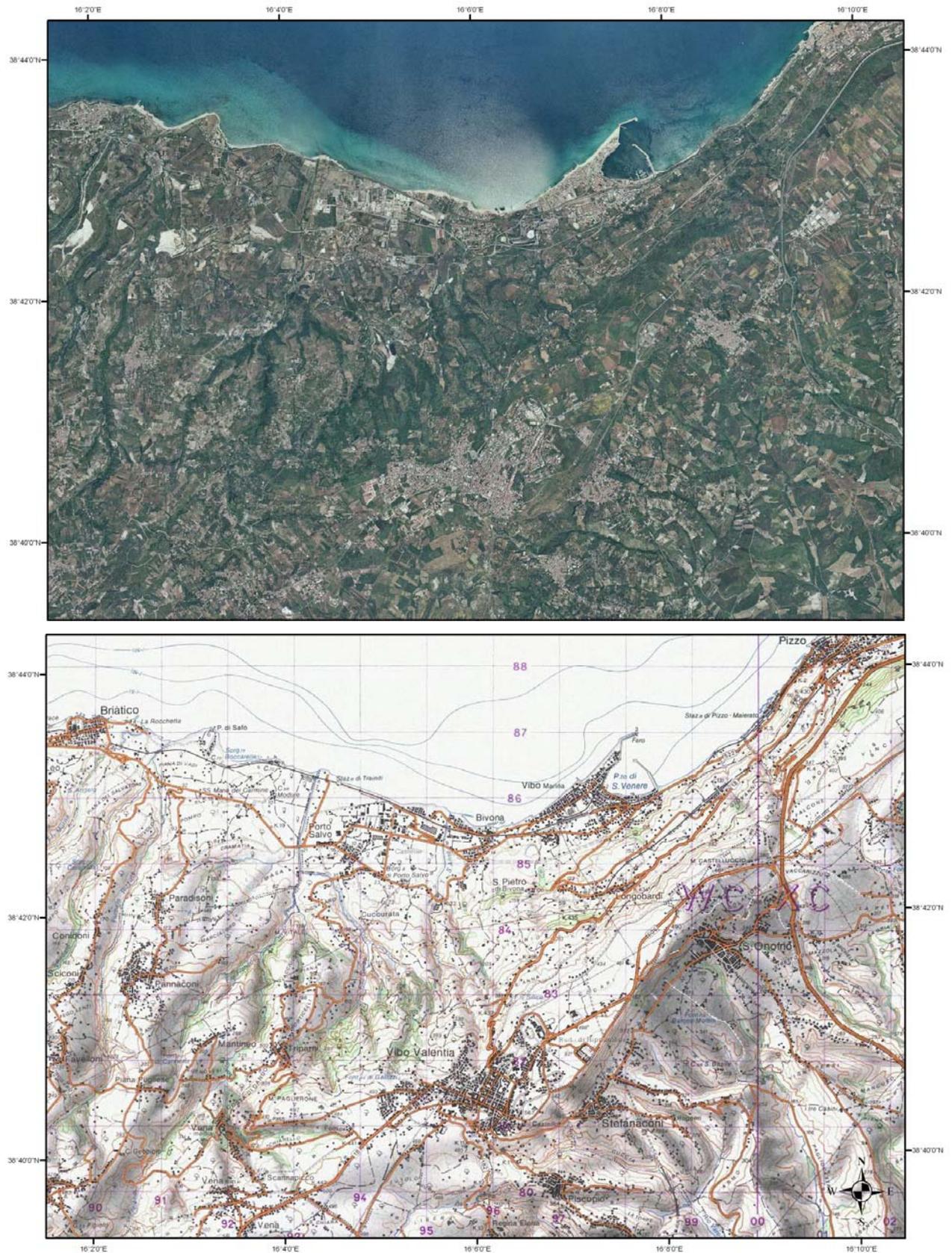


Figura 49. Foto aerea e carta topografica della città e l'hinterland di Vibo Valentia

Relativamente al massiccio del M. Poro, attualmente il massimo sollevamento può essere stimato in prossimità delle città di *Brattiro'*, *Spilinga*, *Rombiolo*, *Filandari* e *Jonadi*, (Ghisetti, 1979).

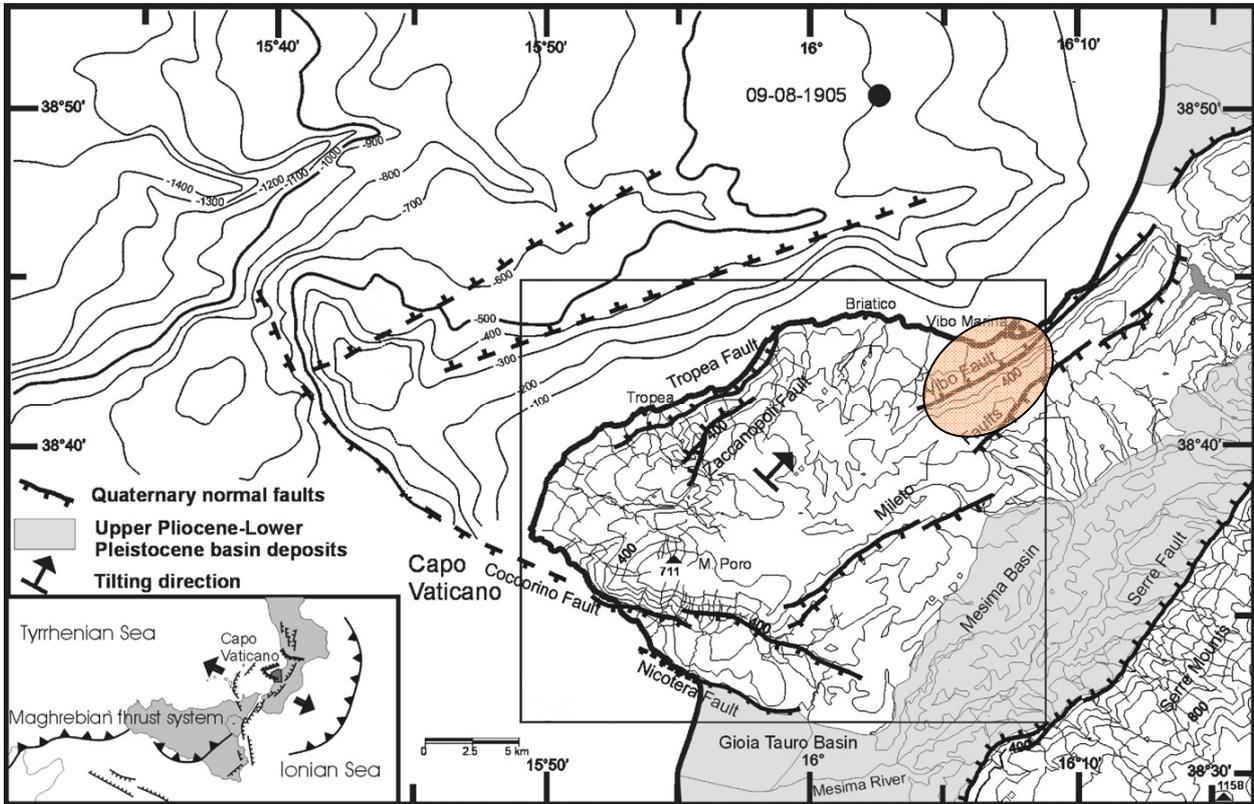


Figura 50. Carta strutturale della penisola di Capo Vaticano e dell'off-shore Tirrenico, (da Tortorici, 2003).

I dati batimetrici derivano da Argnani e Trincardi (1988). È illustrato anche l'epicentro del sisma del 8 settembre 1905 (punto in nero). Le lineazioni con i triangoli indicano il fronte del thrust belt, le linee con i trattini le principali faglie normali del tardo quaternario che definiscono la "Rift Zone Siculo-Calabra" (Monaco e Tortorici, 2000); le frecce nere mostrano la direzione di massima estensione, (modificata da Tortorici 2003). L'ovale puntinato in arancione indica l'area concernente la città e l' hinterland di Vibo Valentia.

La Penisola di Capo Vaticano è un *alto strutturale* bordato da segmenti di faglie normali appartenenti alla "Calabro-Sicula Rift Zone" (Monaco e Tortorici, 2000), principalmente orientate NE-SW e WNW-ESE. Da un punto di vista geologico, la Penisola di Capo Vaticano si compone principalmente di graniti e gneiss Paleozoici, coperti dai resti discontinui di carbonati miocenici e pliocenici e da depositi terrigeni (Burton, 1971). Durante il post Pliocene-Quaternario inferiore, la zona è stata interessata dallo sviluppo di faglie normali, (Ghisetti, 1979) di lunghezza variabile tra i 10 ai 45 Km; la direzione di estensione massima nell'area è orientata ESE-WNW (Cello et al., 1982 ; Tortorici et al., 1995). Queste hanno causato la formazione di alti strutturali e di bacini sedimentari marini. Dalle faglie longitudinali risultano, da ovest a est, l'alto di Capo Vaticano, il bacino del Mesima e il massiccio delle Serre, mentre le faglie

trasversali hanno isolato a sud il bacino di Gioia Tauro. In quest'area sono stati identificati sei ordini di terrazzi marini con le loro paleo-linee di costa (shorelines) preservate (Figura 51).

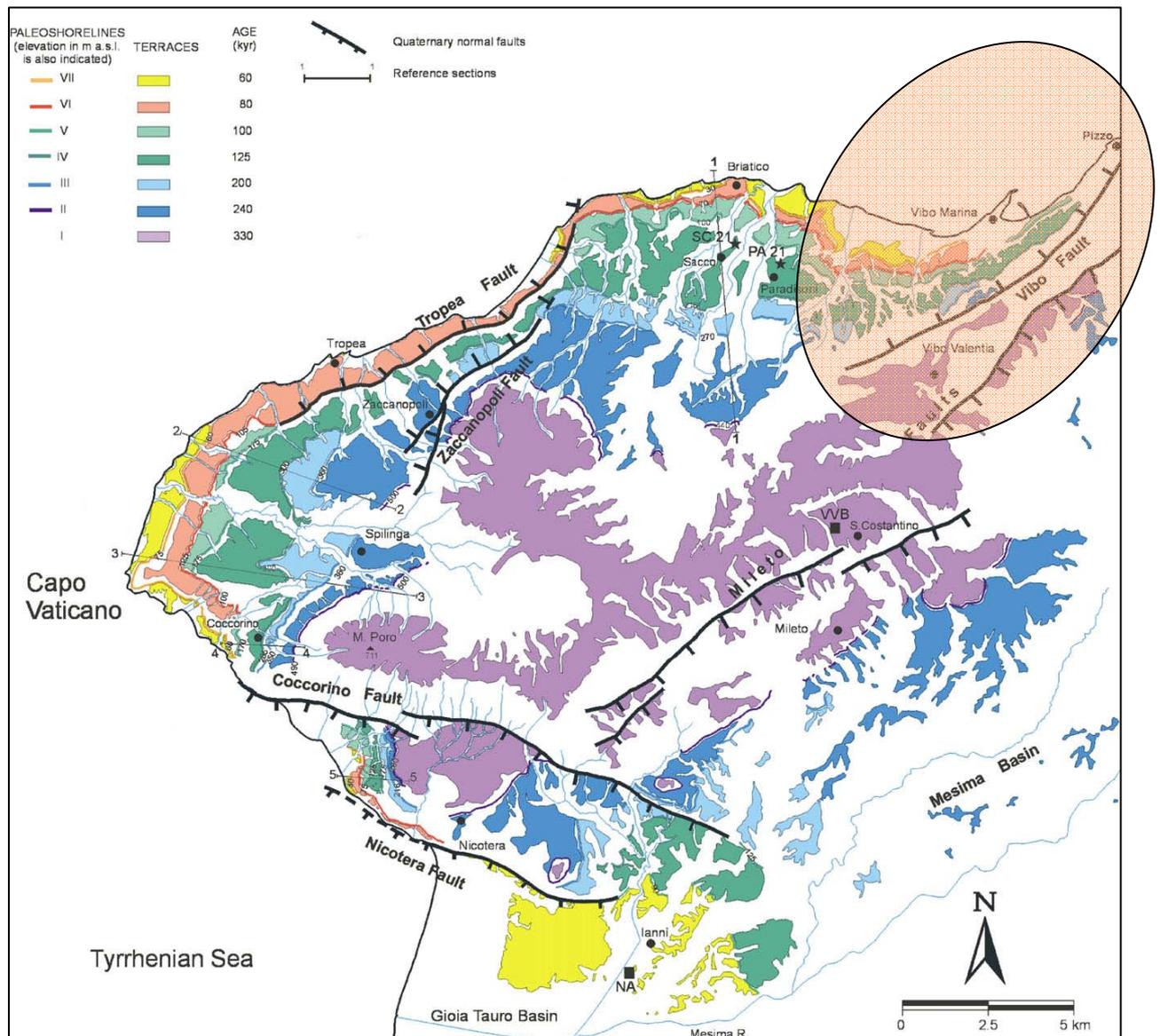


Figura 51. Carta morfo-tettonica della Penisola di Capo Vaticano.

È mostrato l'ordine dei terrazzi marini osservati. L'ovale puntinato in arancione indica il settore concernente la città e l' hinterland di Vibo Valentia.

Essi formerebbero un insieme continuo di elementi morfologici attribuiti ai sette ultimi principali picchi della curva eustatica sulla base di nuovi dati cronologici disponibili nella letteratura recente (Tortorici, 2003). L'analisi morfotettonica delle *paleoshorelines* ha permesso l'identificazione di un modello di deformazione caratterizzato da un'inclinazione di questo settore verso NE e una quantificazione del tasso di sollevamento stimato in circa 1mm/anno

(Tortorici, 2003). Questo dato sembrerebbe confermato dal fatto che per un segmento della faglia di *Coccorino* (Figura 50) è stato stimato uno slip rate variabile da 0.25 e 2.5 mm/anno a partire all'incirca dal Pleistocene (Tortorici, 2003). In questo contesto strutturale, il sollevamento post Quaternario della penisola di Capo Vaticano può essere legato all'attività di tutti e due i sistemi di faglie NE-SW e WNW-ESE, supplementare alla generale componente regionale di sollevamento. L'attività recente di queste strutture è suggerita anche dal terremoto del 1905 che si è prodotto di fronte alla costa di Vibo Marina (CPTI, 2004). Questo sisma, caratterizzato da un'intensità MCS X-XI e una $M \approx 7$ (Postpischl, 1985), è stato accompagnato da uno *tsunami* che ha severamente devastato il litorale tra Vibo Marina e Tropea, oltre ad avere causato diversi effetti al suolo come fratture, frane e crateri di sabbia intorno alla costa tirrenica della Calabria Centrale. L'attività di innalzamento, cominciata tra 300.000 e 240.000 anni, può essere considerata come il prodotto dell'attività dei segmenti di faglie identificate e del tasso generale di sollevamento regionale. La geometria delle paleoshorelines indica che tale processo avveniva in modo asimmetrico con tassi di sollevamento maggiori verso S-W (Tortorici, 2003). Il risultato è stato l'inclinazione dell'intera penisola a NW. L'attività tettonica sembra continuare anche oggi, come suggerito dalla forte sismicità dell'area colpita da numerosi terremoti storici (i.e. 1638, 1783, 1905; Postpischl, 1985). Specificatamente il centro abitato di Vibo Valentia e il suo hinterland è collocato nella parte Nord-Orientale dell'horst descritto dove rocce gneissiche dell'Unità di "*Polia Copanello*" sono ricoperte da potenti strati d'alterazione sui quali si trovano coperture pleistoceniche. Questa zona, rappresenta uno dei settori tettonicamente attivi dell'Arco Calabro (Tortorici, 2003), (Figura 52).

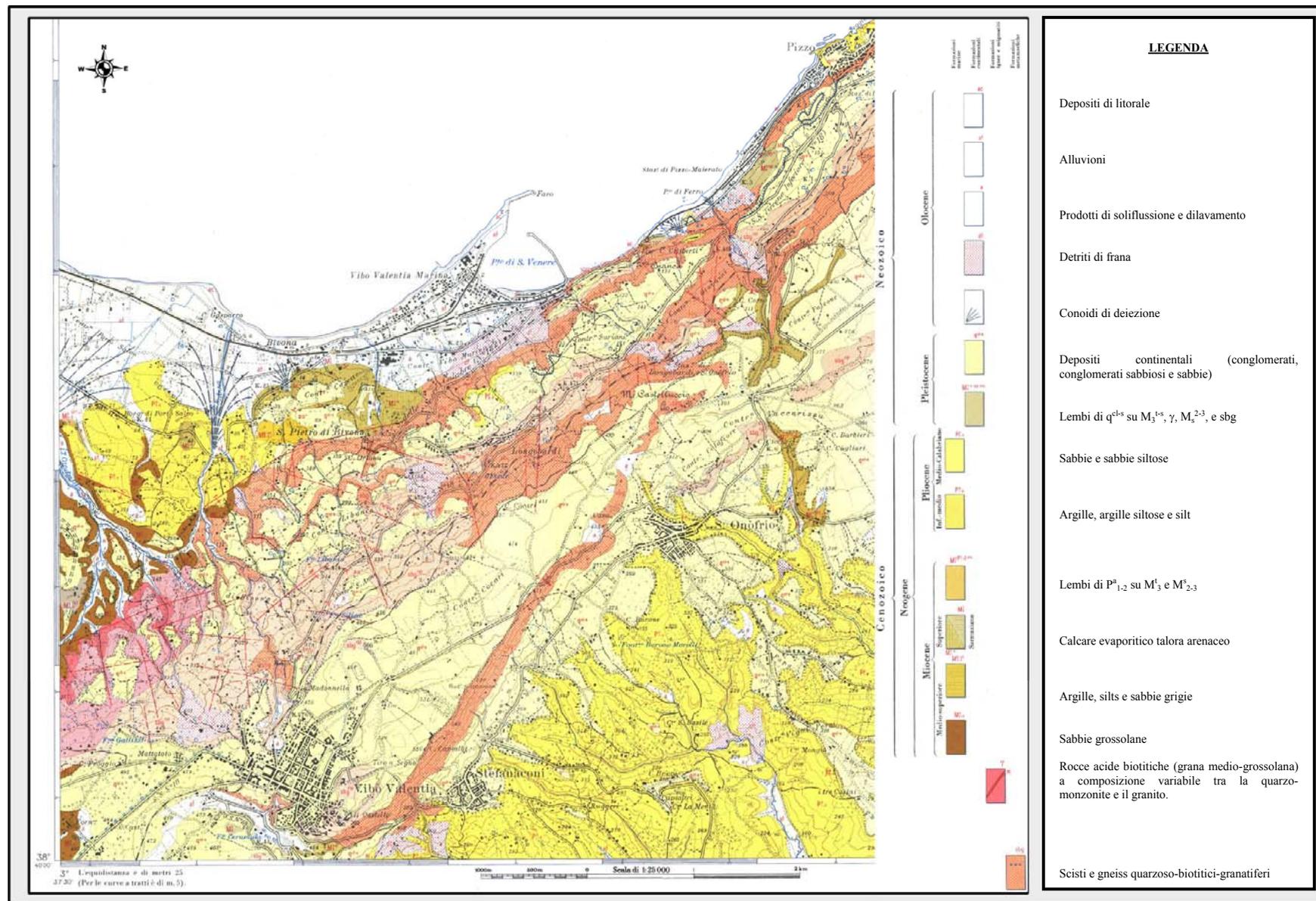


Figura 52. Carta geologica della città e l'hinterland di Vibo Valentia (Casmèz, 1967).

L'elevata intensità della dinamica geomorfica della zona è testimoniata chiaramente dalla riattivazione di fenomeni gravitativi avvenuti negli ultimi secoli, (Guerricchio, 2000). La tettonica rappresenta il motivo principale dell'intensa morfodinamica del territorio, anche se elementi determinanti sono costituiti dall'organizzazione geologico-strutturale, che controlla quella morfologica e dal clima, caratterizzato da forti contrasti stagionali e da avvenimenti idrologici estremi come quello del 3 luglio 2006 che ha provocato gravi danni alle infrastrutture, senza tetto e vittime (Figura 53).



Figura 53. Foto alluvione Vibo Valentia del 3 Luglio 2006.

3.3 Le deformazioni catalogate.

In tutta la regione è possibile osservare diversi tipi di deformazione gravitativa: frane propriamente dette, grandi frane e Deformazioni Gravitative Profonde di Versante (DGPV), subsidenze, ecc. Spesso, lo studio di queste deformazioni porta a concludere che quelle catalogabili come “recenti” hanno invece avuto un’evoluzione durata migliaia di anni, così come piccole deformazioni localizzate si inscrivono spesso nel quadro di grandi frane e/o di DGPV. Quindi, essendo l’utilizzo delle tecniche di misura degli spostamenti di superficie relativamente recente, le deformazioni oggi rilevate probabilmente non sono rappresentative di tutta la loro storia evolutiva. Questa considerazione risulta ancora più significativa per deformazioni monitorate da poco tempo, attraverso la geodesia satellitare. In ogni caso, avendo l’antropizzazione del territorio sicuramente accelerato alcune situazioni di dissesto idrogeologico, il controllo di contesti potenzialmente pericolosi e la possibilità di identificarne di nuovi risulta sicuramente essenziale per la sicurezza della popolazione residente, indispensabile per la pianificazione dello sviluppo urbano e importante per la ricerca scientifica fondamentale e applicata. Di seguito verranno presentati i dati ufficiali disponibili sulle deformazioni gravitative attualmente catalogate per le aree oggetto dello studio.

I dati disponibili sul territorio calabrese

A livello nazionale diversi sono stati i tentativi di realizzare studi organici e completi per la costruzione di cataloghi dei fenomeni d’instabilità idrogeologica e il loro successivo controllo. Uno dei più recenti e qualificati progetti è stato il *Progetto Speciale AVI*, ordinato dal Ministero della Coordinazione e della Protezione Civile al *Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche* (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Lo scopo era di realizzare un inventario delle aree storicamente vulnerate da calamità geologiche (frane) e idrauliche (piene) per il periodo 1918-1990 (<http://avi.gndci.cnr.it>). Nel 1996 è stata pubblicata una prima carta preliminare delle principali località colpite da fenomeni gravitativi e inondazioni. Si può affermare che, la versione definitiva, sarà uno dei prodotti più accurati ed aggiornati oggi disponibili in Italia e che aiuterà ad avere una visione sinottica della distribuzione degli eventi idrogeologici. Il progetto ha previsto la redazione di schede sugli avvenimenti concernenti soprattutto inondazioni e frane. Ovviamente, anche per la Calabria

esiste oggi un catalogo dedicato. I limiti del progetto AVI sono quelli che derivano dall'assenza di dati scientifici sugli avvenimenti citati in fatti di cronaca e/o riferiti generalmente a tempi molto lontani (prima del 1946). Per il resto, la qualità e l'affidabilità dei dati è considerevole, per cui il lavoro effettuato rappresenta un'eccellente base di dati per numerose possibili ricerche. Tra l'altro costituisce una base di dati per le zone vulnerate e necessariamente dovrà essere trasformata in catalogo delle aree vulnerate. Più recentemente, in Calabria, con la legge regionale del 1996 è stata istituita l'*Autorità di Bacino Regionale* con finalità di conservazione e difesa del suolo. L'*Autorità di Bacino* attraverso il *Piano di Assetto Idrogeologico (PAI)* ha classificato, per tutti i centri abitati della regione, le aree a diverso rischio di frana. L'attività dell'organismo ha portato alla redazione di cartografia tematica per l'intero territorio regionale. Per lo stesso sono state identificate le aree maggiormente interessate da problematiche di tipo gravitativo e caratterizzate da 4 categorie di rischio. *Quindi, è stata costituita la cartografia regionale ufficiale alla quale tutti gli enti sono obbligati a fare riferimento per gli studi di sviluppo e pianificazione urbana o di installazioni infrastrutturali. Finalmente la documentazione fornita risulta essere quella in vigore e "obliterante" i regolamenti urbanistici locali.*

Di seguito, sarà dunque illustrata la cartografia di sintesi su cui sono state identificate le zone più pericolose relativamente all'instabilità gravitativa nelle aree concernenti la nostra ricerca (Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57).

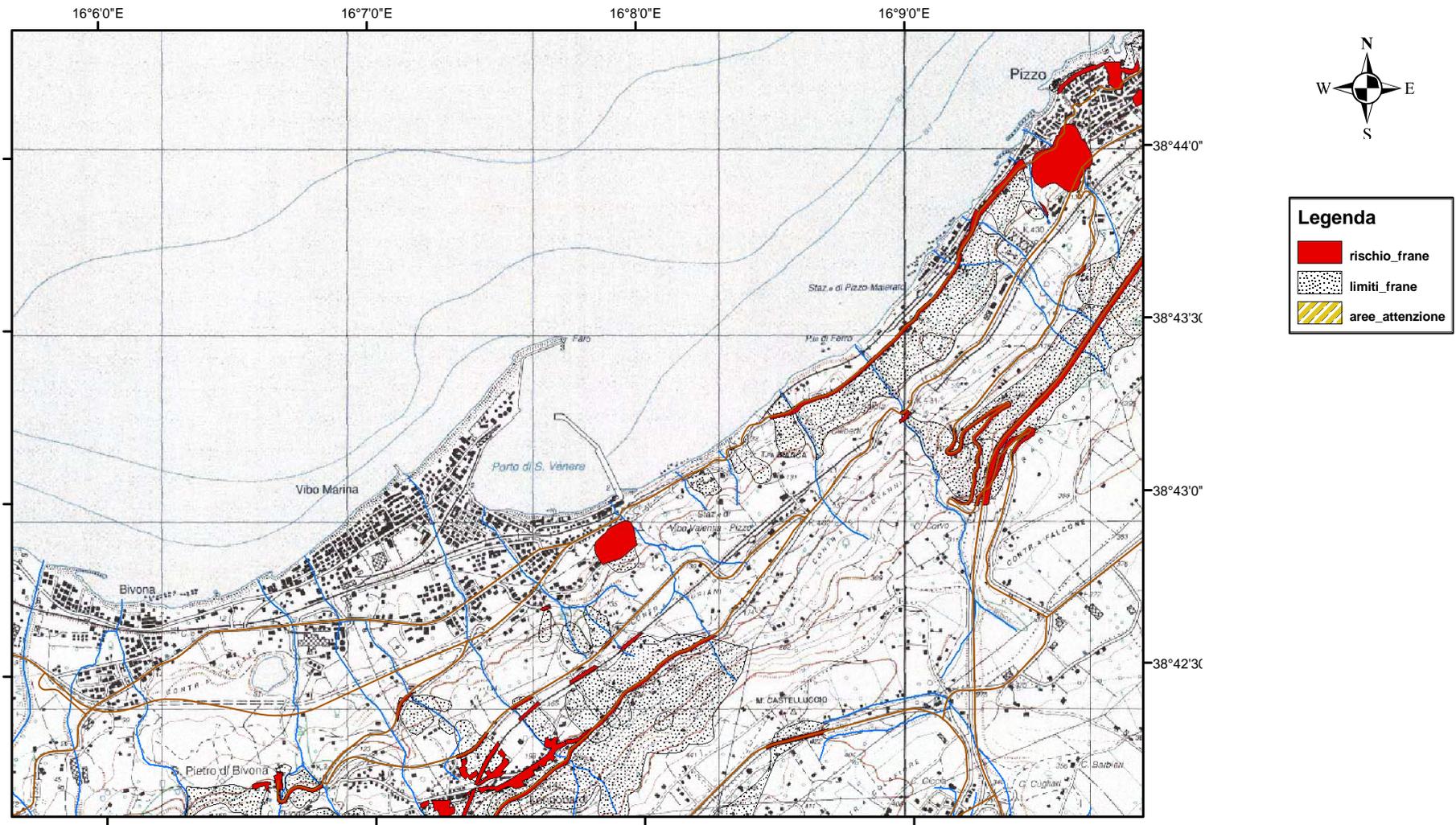


Figura 54. Cartografia di sintesi delle aree ad elevato rischio di frana del territorio di Vibo Marina e Pizzo Calabria.

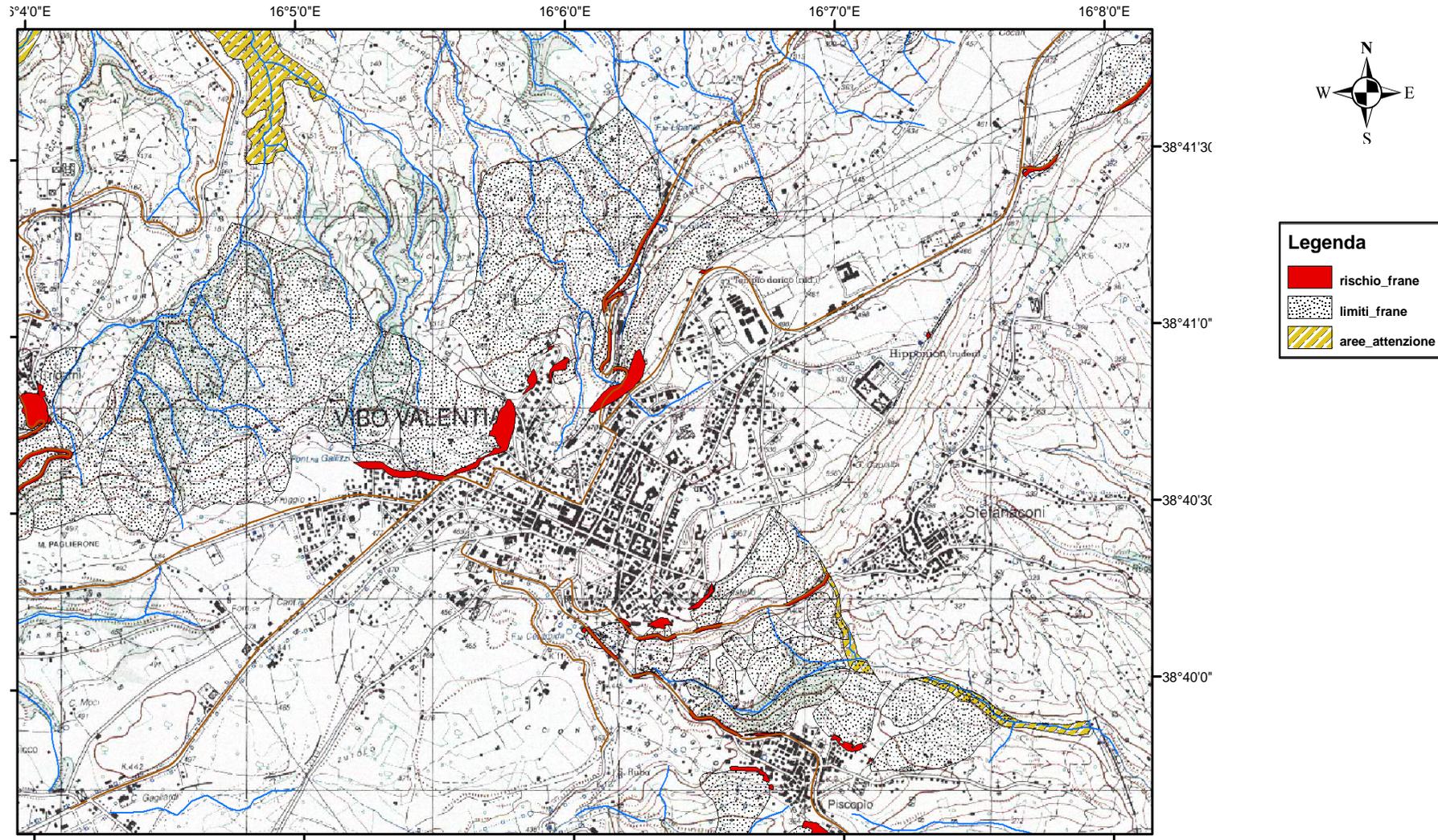


Figura 55. Cartografia di sintesi delle aree ad elevato rischio di frana e le aree di attenzione dal punto di vista idraulico del territorio di Vibo Valentia.

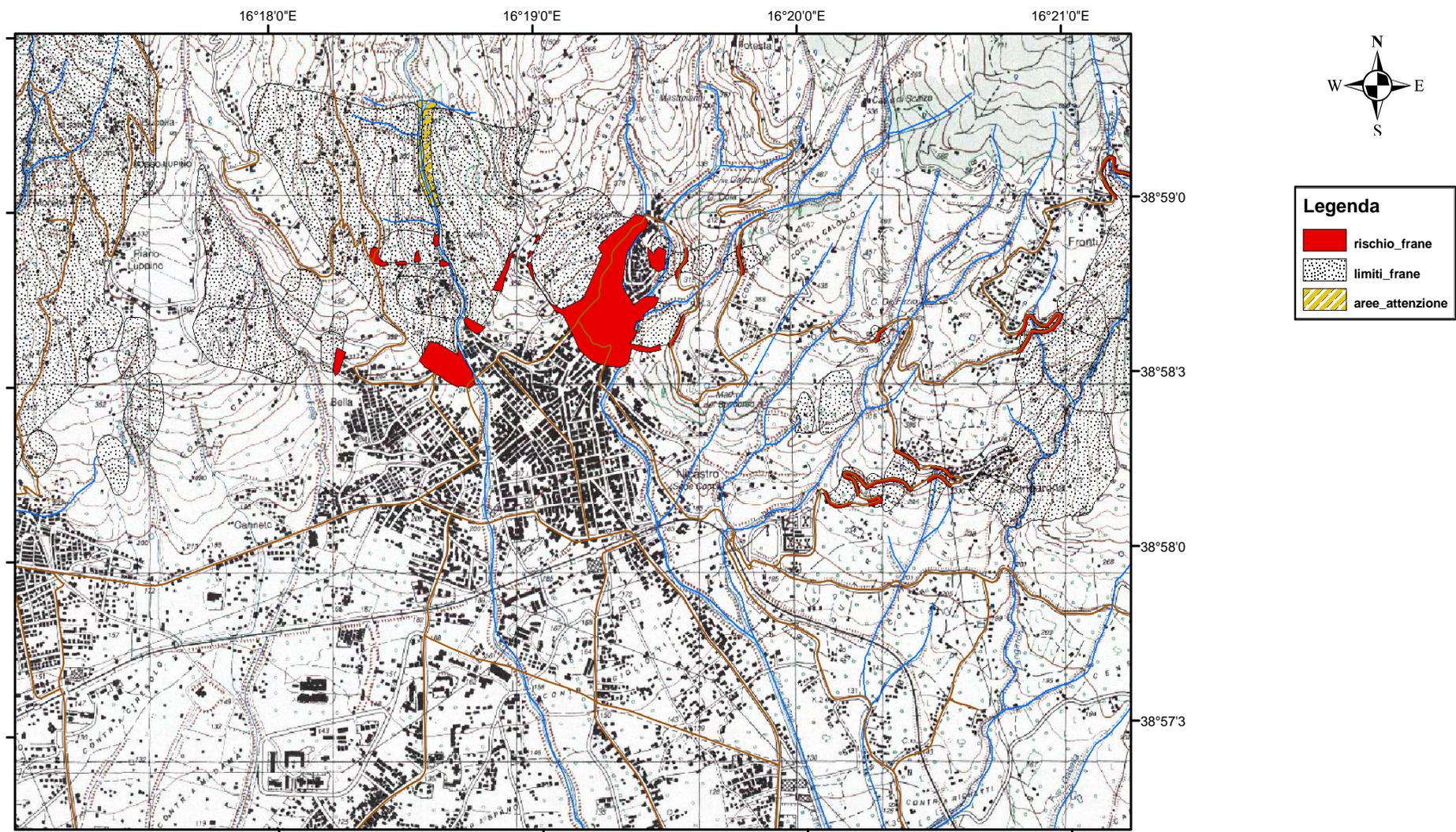


Figura 56. Cartografia di sintesi delle aree ad elevato rischio di frana del territorio di Lamezia Terme.

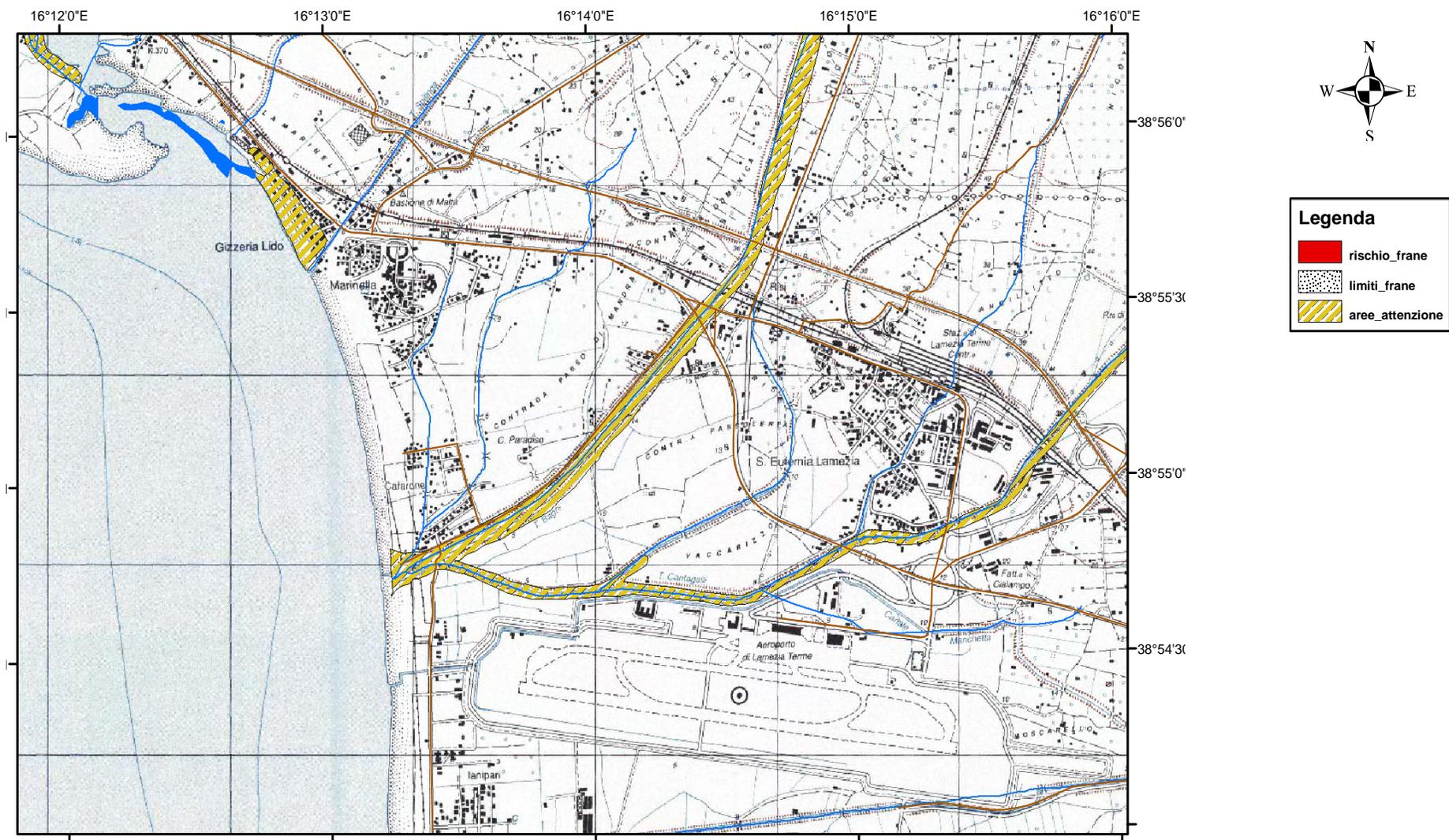


Figura 57. Cartografia di sintesi delle aree di attenzione dal punto di vista idraulico del territorio relativo all'aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme.

Molti dei siti individuati sono stati già oggetto di interventi di mitigazione. Per gli altri devono essere integrati i dati generali, perfezionati i modelli di analisi della pericolosità, reso possibile il controllo assolvendo, allo stesso tempo, alle funzioni di allertamento e supporto per la realizzazione di misure di protezione civile. Infine valutare l'efficacia e la pertinenza delle opere di stabilizzazione e consolidamento realizzate. Oltre a ciò, l'Autorità di Bacino, realizza nuovi progetti di controllo, in continuo o periodici, sui siti in frana ad alto rischio. Essa propone lo sviluppo di ricerche da applicare in contesti differenti che, attraverso lo studio della dinamica dei versanti, potranno permettere di definire modelli geologico-evolutivi dei versanti prototipo rappresentativi di situazioni di rischio elevato a scala regionale, (<http://www.autoritadibacinocalabria.it>).

Uno degli obiettivi di questo lavoro di tesi è sicuramente quello di voler rendere disponibili i dati derivati dall'interferometria radar per l'avanzamento della conoscenza su siti ritenuti importanti.

3.4 I fattori limitanti l'osservazione interferometrica in Calabria e nel territorio di studio.

Nel Capitolo 2, sono state esaminate le fonti di errore e le limitazioni dell'osservazione degli spostamenti derivati dall'interferometria radar differenziale. Di seguito sono trattati in modo più specifico le limitazioni proprie in Calabria e specificatamente quelle legate alle caratteristiche geografiche e geomorfologiche del territorio di studio. Di queste, si riportano principalmente quelle legate alla morfologia, all'uso del suolo e al clima.

Caratteristiche del rilievo

Le zone montuose occupano una buona parte del territorio regionale (Figura 58 a). Come già descritto esistono diversi complessi montuosi che a partire da Sud sono rappresentati dall' "Aspromonte", dal "Massiccio delle Serre", dalla "Catena Costiera", dalla "Sila" e dal "Pollino", con cime che arrivano fino ad oltre i 2000 m di quota. Il passaggio dal livello mare alla pianura, fino alle cime più alte, è molto rapido, particolarmente sulla parte occidentale della "Catena Costiera" e nel promontorio del "Monte Poro". Il sollevamento regionale si manifesta con un'erosione molto attiva, responsabile dell'incisione di profonde valli che danno luogo a versanti molto ripidi. La carta delle pendenze (Figura 58 b) mostra un territorio caratterizzato da cambi repentini di topografia, con forti pendenze e inclinazioni che eccedono spesso i 30°. Queste particolarità, che ovviamente ricorrono anche nelle specifiche zone scelte per lo studio, ricoprono un ruolo importante relativamente all'applicazione della tecnica interferometrica differenziale.

L'importanza della pendenza locale del terreno in interferometria è stata sottolineata nel Capitolo 1. I differenti sistemi SAR, imbarcati sui satelliti, hanno angoli d'incidenza variabili generalmente tra 15 e 60° rispetto all'orizzontale. Quando l'angolo d'incidenza è piccolo, l'immagine è molto sensibile ai fenomeni di "schiacciamento" e "ricoprimento". Questi effetti possono essere ridotti se l'angolo d'incidenza è grande, ma in questo caso diventeranno più importanti i problemi di "shadow". L'ombra radar genera una perdita totale e irreversibile d'informazione mentre il "ricoprimento", facendo sovrapporre gli impulsi di ritorno, rende i pixel interessati quasi non sfruttabili. I due effetti introducono delle discontinuità nella fase interferometrica. L'angolo d'incidenza del satellite su terreno piatto può variare tra 19 e 27°. Le pendenze orientate verso il radar e eccedenti questo valore sono soggette a « ricoprimento ». Le

zone d'ombra esistono invece nei casi in cui la pendenza opposta al radar eccede 70° caso che si presenta raramente.

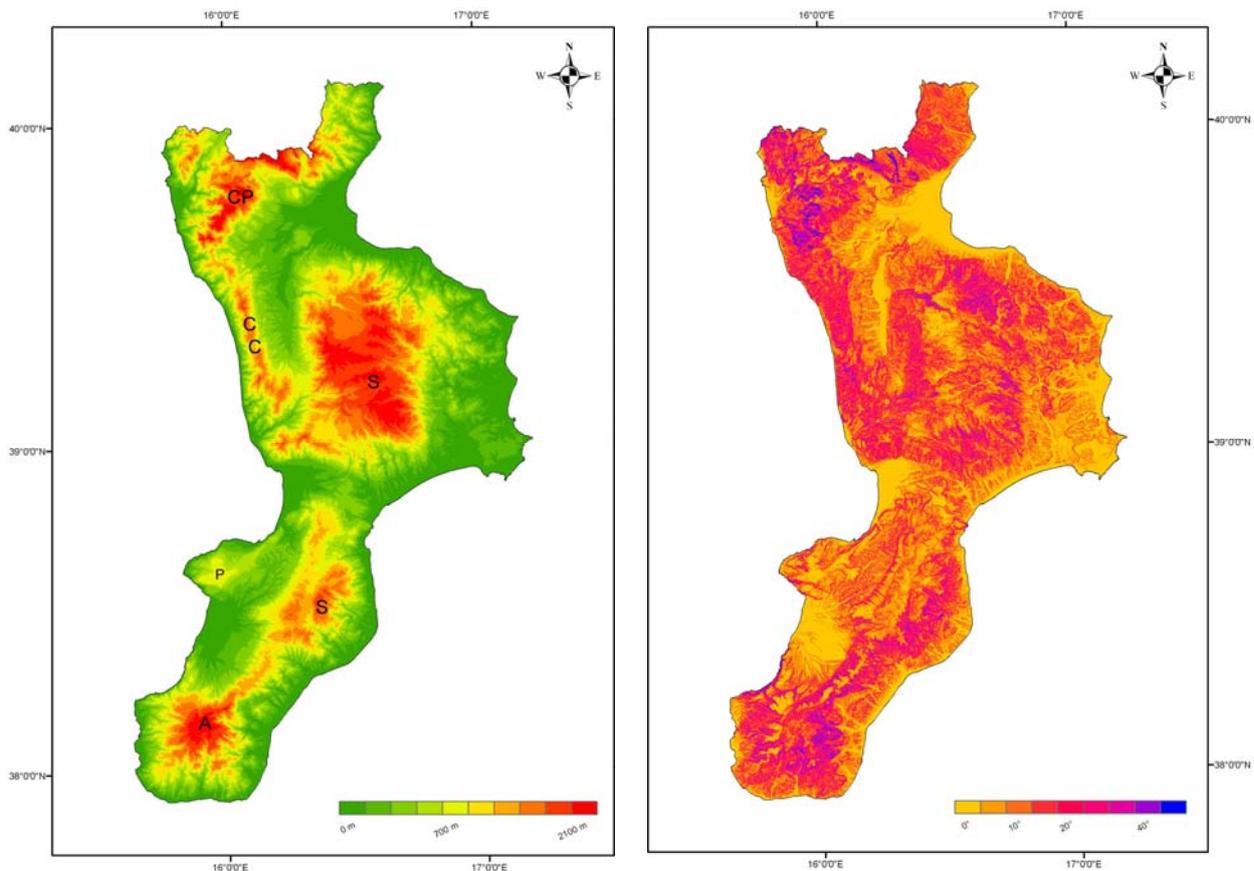


Figura 58. Rilievo e carta delle pendenze della Calabria.

a) a sinistra, Modello Digitale del Terreno, CP = “ Catena del Pollino ” ; CC = “ Catena Costiera ” ; S = “ Sila ” ; P = “ Monte Poro ” ; S = Serre ; A = “ Aspromonte ” . **b) a destra, Carta delle pendenze.**

Uso del Suolo

Le caratteristiche fisiche del suolo e la loro evoluzione sono determinanti per l'analisi interferometrica. La Calabria presenta il 49,2% di superficie collinare, il 41,7% di zone montagnose e solamente il 9% di pianura. Queste si estendono su una superficie di circa 15000 km² occupata da circa 2 milioni di abitanti (2001). La densità della popolazione è modesta, essendo quella media di 140 abitanti al Km² e si concentra essenzialmente nelle città capoluogo ed in quelle della pianura costiera. Il tipo di uso del suolo ha delle conseguenze importanti negli studi che prevedono l'utilizzo dell'interferometria radar satellitare. In effetti, la presenza di vegetazione rappresenta un fattore di decorrelazione rapida degli interferogrammi, invece le zone

urbanizzate favoriscono il mantenimento di una coerenza a lungo termine. L'uso del suolo è anche fortemente correlato alla topografia. Al fine di stimare l'influenza del rilievo e dell'uso del suolo in Calabria, abbiamo analizzato dati derivati dai satelliti MODIS per prevedere quali potevano essere le zone che avrebbero conservato una coerenza sufficiente per l'applicazione dell'analisi interferometrica. Questi dati hanno una buona corrispondenza con quelli derivati dalla Corine Land Cover - level 1, (Figura 59). L'osservazione della stessa non fa altro che confermare le valutazioni preliminari fatte e cioè che per la Calabria non esistono aree estese su cui la coerenza mantiene a lungo valori elevati, ma queste risultano circoscritte ai modesti centri urbani e alle aree scarsamente vegetate.

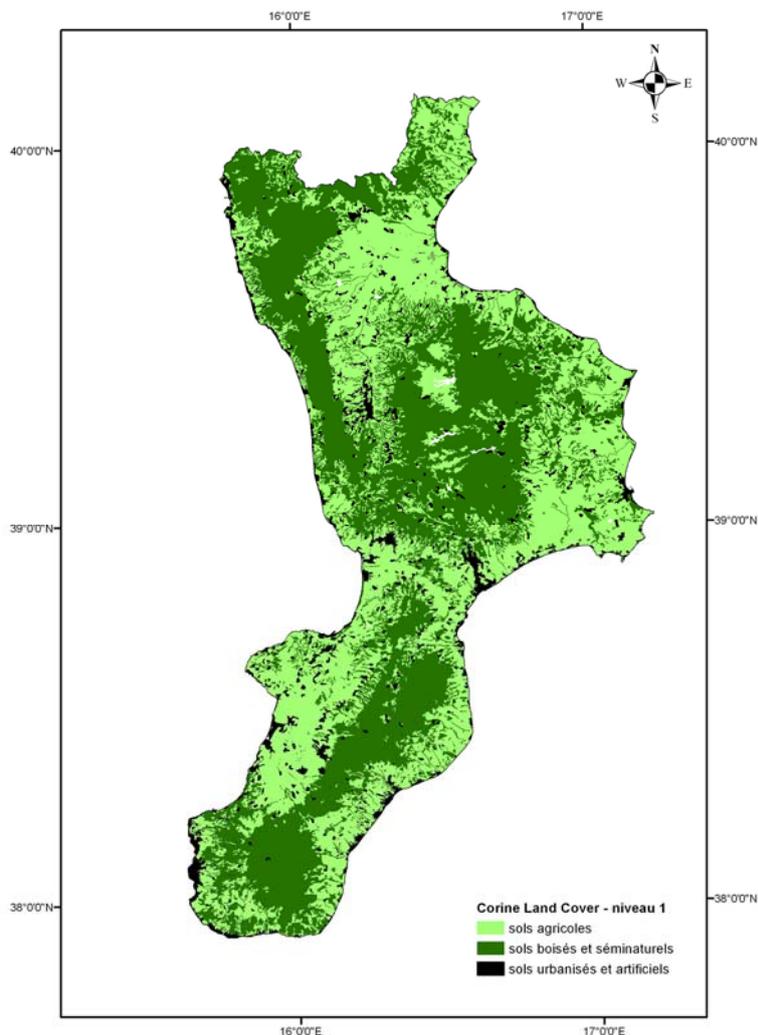


Figura 59. Mappa di uso del suolo Calabria. Corine Land Cover (livello 1).

Clima

La posizione della Calabria e la sua forma a penisola, ci indicano a prima vista condizioni di clima decisamente subtropicali. La realtà è abbastanza diversa. Anche se nessun punto della regione è distante più di 50 Km dal mare, grazie ai rilievi accidentati e ai contrasti morfologici, la Calabria è una delle regioni d'Italia con i più pronunciati contrasti di temperatura, caratterizzata da una considerevole varietà di microclimi e da una grande varietà di vegetazione. L'influenza del mare con il suo clima mediterraneo è evidente solamente sulle coste e le pianure costiere, mentre nell'entroterra e nelle zone montagnose il clima risulta più rigido con abbondanti precipitazioni. La costa ionica ha un clima più caldo e secco di quella tirrenica risultando una delle zone più calde della penisola. Se ci si ferma all'analisi dei due parametri meteo-dinamici della temperatura e della precipitazione (Figura 60), si può dividere la Calabria in sette aree microclimatiche omogenee : le zone Montuose, le Piane, il "Marchesato", il litorale Tirrenico, il litorale Ionico, il "Vibonese" e l'area dello Stretto (ARSSA Calabria). Questi tipi di microclimi e il forte rilievo sono parzialmente responsabili di una discreta erosione che è un fattore sfavorevole all'osservazione interferometrica, necessitando quest'ultima della conservazione dello stato di superficie. In generale, la stagione secca preserva meglio la coerenza rispetto a quella umida. Anche le forti variazioni di umidità, rappresentano ugualmente un fattore sfavorevole poiché queste introducono perturbazioni atmosferiche negli interferogrammi che risultano attualmente complicate da rimuovere.

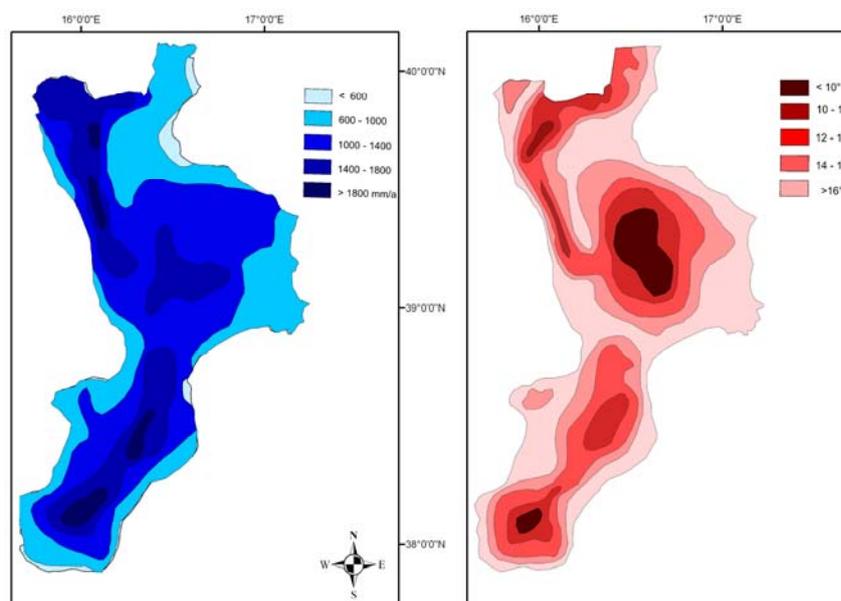


Figura 60. Mappe della densità media di pioggia e della distribuzione media di temperatura riferite ai 12 mesi.

3.5 Selezione delle immagini SAR satellitari

3.5.1 Fattori condizionanti

Ogni immagine derivata dai sensori SAR ERS e ENVISAT (configurazione narrow swath) copre un territorio di circa 100x100 Km. Come nel caso delle coperture aeree tradizionali, anche le acquisizioni ERS-SAR sono realizzate lungo strisciate che corrispondono in pratica alla traccia del movimento del satellite (*track*).

Vista la disposizione dell'antenna (*orientata a destra*) e le caratteristiche delle orbite in corrispondenza del territorio calabrese, la direzione di vista è, approssimativamente, WNW in configurazione discendente e ENE in ascendente (Figura 61). Considerata buona la sensibilità della tecnica nella misura della componente dello spostamento lungo la direzione di vista del satellite, i versanti visti frontalmente, con la possibilità di misura quasi totale della componente del movimento a terra, saranno :

- quello esposti a Ovest (tra NW e SW) con acquisizioni in orbita discendente ;
- quelli esposti a Est (tra NE e SE) con acquisizioni in orbita ascendente.

Nel caso in cui non ci siano ostacoli che creano “ombre” alla vista del satellite, è teoricamente possibile sorvegliare i siti utilizzando sulla stessa zona le due tipologie di acquisizione.

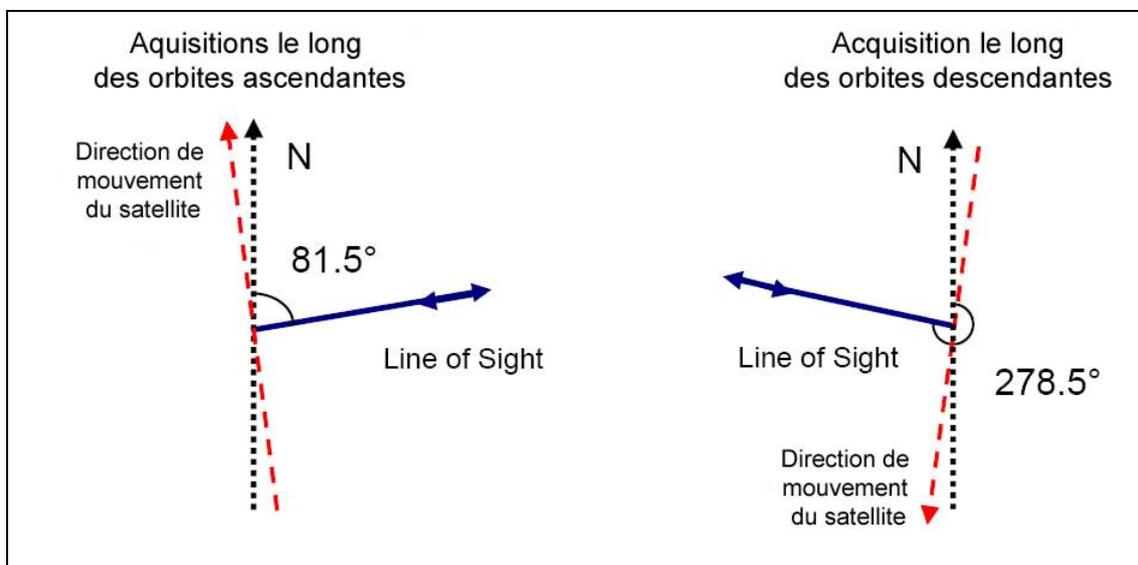


Figura 61. Schema relativo alla proiezione planimetrica della linea di vista del satellite.

I siti esposti a Nord o a Sud risultano invece i più problematici, poiché la componente del movimento del versante lungo la linea di vista del satellite potrebbe risultare ridotta. Infatti, la

maggior parte del movimento si produce parallelamente alla direzione dell'orbita e quindi non risulta ottimamente investigabile dal sistema.

L'elaborazione SAR interferometrica permette di derivare anche Modelli Digitali di Superficie (Digital Surface Model – DSM) attraverso coppie di acquisizioni SAR ad alta coerenza, o meglio acquisizioni “tandem”, con un giorno di intervallo. Generalmente, invece, le acquisizioni di una stessa zona si producono ogni 35 giorni. Bisogna tuttavia precisare che, i satelliti possono allontanarsi dalle loro orbite teoriche anche di diverse centinaia di metri e che il confronto tra due acquisizioni successive caratterizzate da orbite con distanza (*baseline*) inferiore a un centinaio di metri, non è sempre possibile. Perciò, non tutte le acquisizioni sono utilizzabili per il confronto reciproco. Dunque gli intervalli temporali sui cui in seguito controllare gli spostamenti possono essere anche di qualche mese e relative a diverse coppie di acquisizione.

Un altro fattore condizionante riguarda le condizioni meteorologiche al momento dell'acquisizione: anche se esistono metodologie sperimentali per correggere eventuali artefatti atmosferici, è sempre indicato verificare la similitudine delle condizioni tra due acquisizioni da confrontare.

3.5.2 Immagini selezionate

Considerando i fattori elencati nel paragrafo precedente è stata in un primo momento consultata la base di dati raccolti dai satelliti ERS-1/2 e ENVISAT fornita dall'*European Space Agency* e consultabile con il “Deskviewer” disponibile sul sito del consorzio *Eurimage* che gestisce la commercializzazione dei dati ERS e ENVISAT in Europa (<http://www.eurimage.com/sitoitalia/DESCW/descw.html>). Il software DESCW – Display Earth remote sensing Swath Coverage for Windows – permette la ricerca dei dati più adatti attraverso l'analisi di tutte le acquisizioni possibili. Le analisi si realizzano attraverso l'utilizzo di una carta geografica di riferimento e di dati relativi alle orbite dei satelliti. Sulle acquisizioni disponibili e relative allo stesso frame è possibile fare una selezione delle coppie di immagini con baseline inferiore ai 100 m. Si sono così determinate tutte le acquisizioni centrate sulle zone scelte.

Preliminarmente, si sono distinte due “serie” temporali d'interesse ai fini della ricerca (Figura 62):

- serie 1: dati ERS (Ottobre 1998 - Agosto 2000), Track 451 – Frame 2825 ;

- serie 2: dati ENVISAT (Mars 2004 - Settembre 2005), Track 451 – Frame 2825.

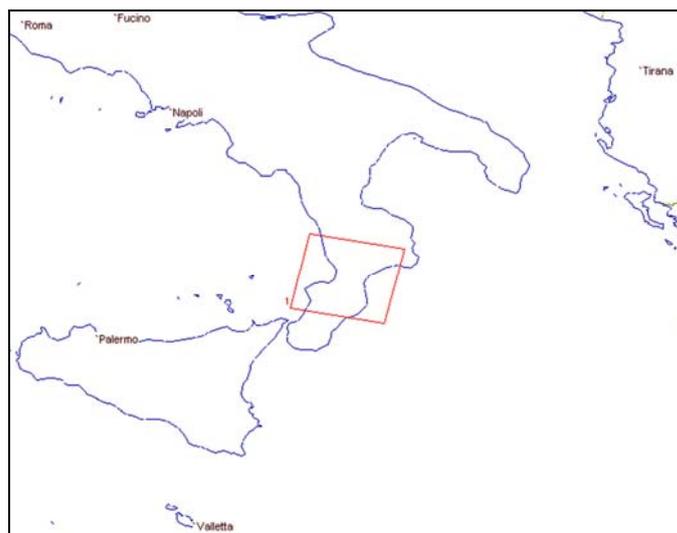


Figura 62. Copertura delle immagini satellitari SAR centrate sul territorio di studio Track 451, Frame 2825 (da DESCW).

Prima dell'acquisizione delle immagini si è proceduto ad un'ulteriore analisi dell'esposizione dei versanti con l'utilizzo di un Modello Digitale del Terreno messo a disposizione dal Centro Cartografico Regionale (Figura 63). A completamento di questa ricerca si è proceduto all'analisi dei dati meteorologici relativi alla zona. Ciò per facilitare la selezione di immagini SAR per date in cui la copertura nuvolosa e le condizioni climatiche non ponevano ulteriori problemi alla fase del processing.

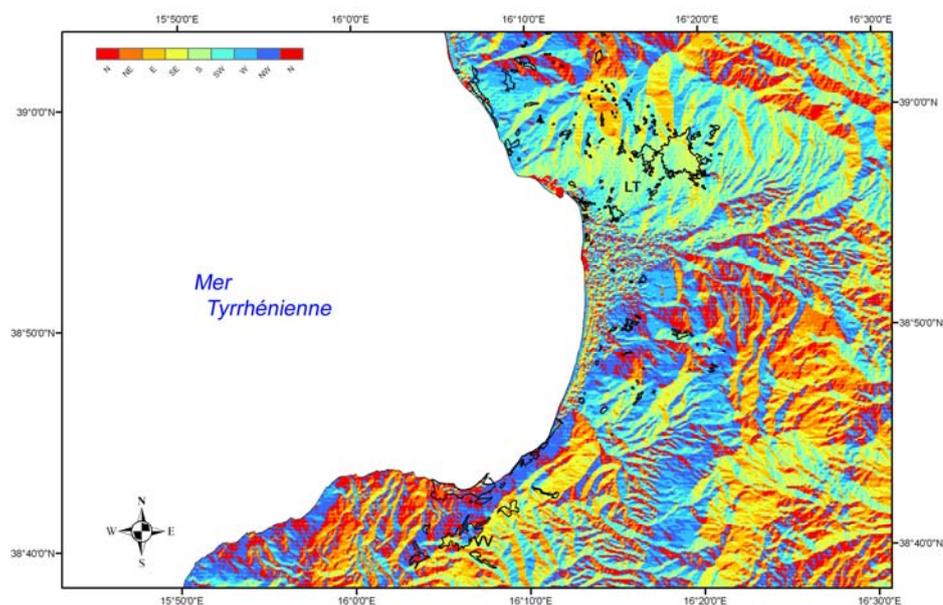


Figura 63. Mappa di esposizione dei versanti per il territorio investigato.

La mappa rappresenta, in scala di colore, le orientazioni dei versanti relativi alla zona oggetto dello studio. LT e VV indicano rispettivamente le città di Lamezia Terme e Vibo Valentia.

In pratica, l'effetto della pioggia può influire molto negativamente sul parametro "coerenza" soprattutto per uno studio che ha come obiettivo la detezione di modeste deformazioni del terreno.

Deve essere sottolineato che i frame relativi al periodo autunno 2000 - primavera 2004 non sono stati acquisiti anche a causa di problematiche tecniche legate all'acquisizione di dati proprio del satellite ERS e ai problemi che hanno caratterizzato il satellite ENVISAT all'inizio della sua missione con conseguente insufficiente qualità delle immagini prodotte. La ricerca nell'archivio ESA si è conclusa con la scelta dell'orbita discendente caratterizzata dal maggiore numero di acquisizioni. Si è optato per l'utilizzo di immagini discendenti al fine di ridurre gli effetti di "foreshortening" e per avere dati più sensibili agli spostamenti presunti. La scelta è caduta sulle seguenti scene (Figura 64):

- serie 1 ERS (1993-2000) Track 451 – Frame 2817-2835, track discendente;
- serie 2 ENVISAT (2004-2005) Track 451 – Frame 2825, track discendente ;

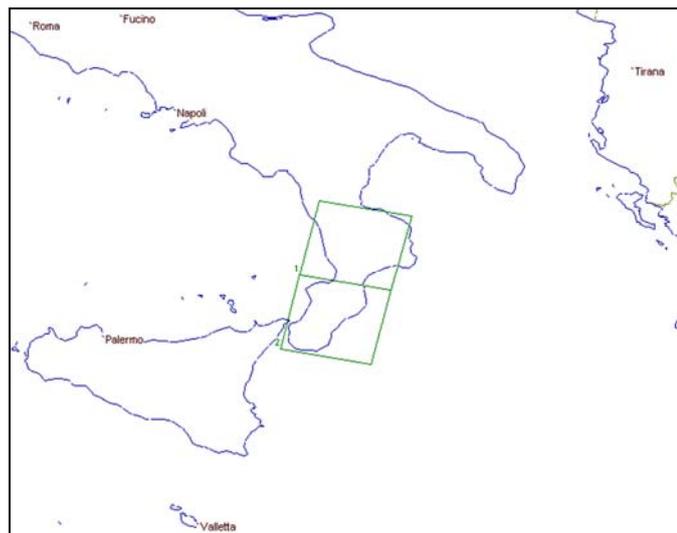


Figura 64. Copertura delle immagini satellitari SAR centrate sul territorio di studio Track 451, Frame 2817, 2835 (da DESCW).

I dati selezionati, in totale 43 immagini ERS e 7 ENVISAT, coprono in totale un periodo che va dall'inizio del 2003 alla fine del 2005 (allegato VII). L'acquisto delle immagini satellitari ERS ed ENVISAT è stato oggetto di una proposta "Category 1" presentata all'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Previo vaglio scientifico della stessa Agenzia, Category 1 consente di acquisire convenientemente immagini SAR utilizzate a scopo di ricerca. Accettata e identificata con ID

C1P.4815, la proposta utilizzata per questa tesi è consultabile sul sito dell'ESA (<http://eopi.esa.int/esa/esa>), (allegato VI).

Essa concerne 100 immagini SAR corrispondenti ai frame precedentemente indicati. L'analisi ha portato alla scelta del formato SLC ritenuto il più conveniente per lo scopo del progetto. Come anticipato, la scelta delle immagini è stata fatta considerando diversi criteri: baseline perpendicolare ridotta, influenza della stagionalità, ecc. Relativamente alla stagionalità, le immagini sono state scelte cercando di assicurare, quando possibile, un campionamento trimestrale con lo scopo di mettere in evidenza eventuali stagionalità dei movimenti.

3.6 Conclusioni

La seppur breve descrizione geologico-geomorfologica delle aree di studio, mette in evidenza l'interesse strategico delle stesse e la fragilità di un territorio su cui la futura pianificazione urbana e infrastrutturale dovrà essere molto attenta. Anche se per le zone non esiste sufficiente materiale scientifico e non sono stati disponibili dati di monitoraggio, durante la redazione dell'ultimo Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Calabria sono state individuate e catalogate alcune zone ad elevato rischio idrogeologico.

Essendo una delle finalità di questa tesi il voler rendere disponibili i dati derivati dall'analisi interferometrica SAR al fine di migliorare la conoscenza dei siti investigati, l'ottimale scelta dei dati da utilizzare non poteva prescindere dall'attenta valutazione dei fattori condizionanti la tecnica e dei problemi operativi esistenti sulle specifiche aree di studio. Nelle ricerche che prevedono l'utilizzo delle tecniche d'interferometria SAR da satellite, la completa conoscenza di tutti i fattori che possono condizionare il risultato (es: rilievo, esposizione, uso del suolo, clima, ecc.) così come quelli propri del sistema (angolo d'incidenza, orbite, ecc) sono fondamentali per l'efficace selezione delle immagini. La redazione di proposte (ESA-CAT 1) che oggi consentono, per scopi di ricerca, di contenere i costi elevati dei dati SAR così come l'utilizzo di software specifici per verificare la disponibilità e l'ordine delle immagini sono da considerarsi parti rilevanti del lavoro ed a cui si deve necessariamente consacrare una parte del tempo previsto per la ricerca.

Capitolo 4 Processing DInSAR

In questo capitolo è illustrato il “processing” effettuato sui dati utilizzati. Sono presentati i metodi scelti ed i software adoperati per arrivare ai dati qualitativi e quantitativi finali. Una parte importante è dedicata all’illustrazione dei principi teorici su cui è basato un originale tool di calcolo (ancora sperimentale) che nel corso di questo lavoro è stato validato su aree e problematiche differenti.

4.1 Scelta del metodo

Esistono differenti metodi e procedure per produrre interferogrammi differenziali a partire da immagini SAR satellitari. Tra i diversi approcci se ne distinguono essenzialmente 2: l’utilizzo di 3 o 4 immagini (Zebker et al., 1994) per realizzare un interferogramma differenziale senza ricorrere all’impiego di un modello tridimensionale del terreno; l’uso di due sole immagini e un DTM (Massonnet e Rabaute, 1993). L’aggettivo “*differenziale*”, deriva dalla necessità di conoscere i valori della topografia per sottrarre gli effetti dovuti al rilievo che, altrimenti, impedirebbero l’identificazione degli spostamenti del suolo. Il secondo approccio esige un Modello del Terreno di discreta qualità al fine di limitare gli errori topografici quando la baseline degli interferogrammi diviene relativamente ampia. La disponibilità sull’area di un DTM di discreta qualità (fornito dal Centro Cartografico Regionale) ci ha permesso di prevedere l’utilizzo del secondo approccio. Informazioni addizionali su questi metodi possono essere trovate in Massonnet e Feigl (1998), Hanssen (2001).

4.2 Descrizione del software utilizzato

4.2.1 Prodotti DInSAR

La procedura utilizzata in questo studio è stata essenzialmente basata sull'utilizzo del software SARscape (www.sarmap.ch) che comprende un insieme di tools dedicati alla generazione di prodotti derivati dai dati SAR satellitari. Il modulo più utilizzato in questa fase è stato quello DInSAR che permette sia la generazione di Modelli Digitali di Superficie che di carte di Deformazione del Suolo, (Figura 65 e Figura 66). Ulteriori procedure, ma soprattutto l'utilizzo di un originale "tool esterno", che infine ha caratterizzato la metodologia di calcolo, sono stati impiegati per ottimizzare il processing e saranno illustrati di seguito. Essenzialmente si sono seguiti i seguenti step successivi :

1. Import dei dati: prima di cominciare il processo interferometrico si è proceduto all'estrazione dei dati relativi al sensore specifico e ai relativi "header parameters";
2. Focalizzazione e multilooking: un'immagine complessa è prodotta da informazioni di fase e intensità. Con l'utilizzo dell'algoritmo "Omega-K" (Rocca, 1987; Prati et al., 1991) si ottiene un'immagine complessa dove i valori di intensità sono relativi alla riflettività del target e l'informazione di fase alla geometria di acquisizione ed alla topografia del terreno. La focalizzazione è stata eseguita solo sui prodotti acquisiti in formato *raw* mentre il multilooking è stato applicato sia ai *raw* che agli *slc* al fine di trasformare i prodotti da *Single Look* (pixel rettangolari) a *Multi Look (pwr)*, (pixel quadrati) e per ridurre l'effetto "speckle";
3. Verifica della baseline: questa operazione ci ha permesso di verificare la veridicità dei dati acquisiti preliminarmente rispetto al valore della baseline e di acquisirne di nuovi relativi ai parametri orbitali di shift;
4. Generazione della fase sintetica: si è cominciato il processing con la generazione di un interferogramma sintetico. Questa procedura abilita un filtro speciale "*spectral shift*" (sviluppato da SARMAP e dal Politecnico di Milano) che, applicato alle immagini "slc" in input, permette la generazione di interferogrammi di migliore qualità. La fase sintetica è stata generata utilizzando come input le due immagini focalizzate ed il DTM messo a disposizione dal *Centro Cartografico Regionale* che dopo una particolare fase di mosaicatura e trasformazione è stato implementato nel software;

5. Generazione dell'interferogramma differenziale: utilizzando una coppia di immagini *slc* si è proceduto alla generazione degli interferogrammi. Avendo generato la fase sintetica di cui al punto 4, l'output di questo step è stato già un interferogramma differenziale, insieme al quale sono state prodotte 2 immagini di intensità coregistrate e corrispondenti rispettivamente alla *Master* e alla *Slave*. Il software ci ha permesso di optare per il calcolo dei parametri di shift, utilizzati per la coregistrazione, direttamente dai parametri orbitali, utilizzando un valore costante oppure variabile linearmente lungo la direzione di azimut;

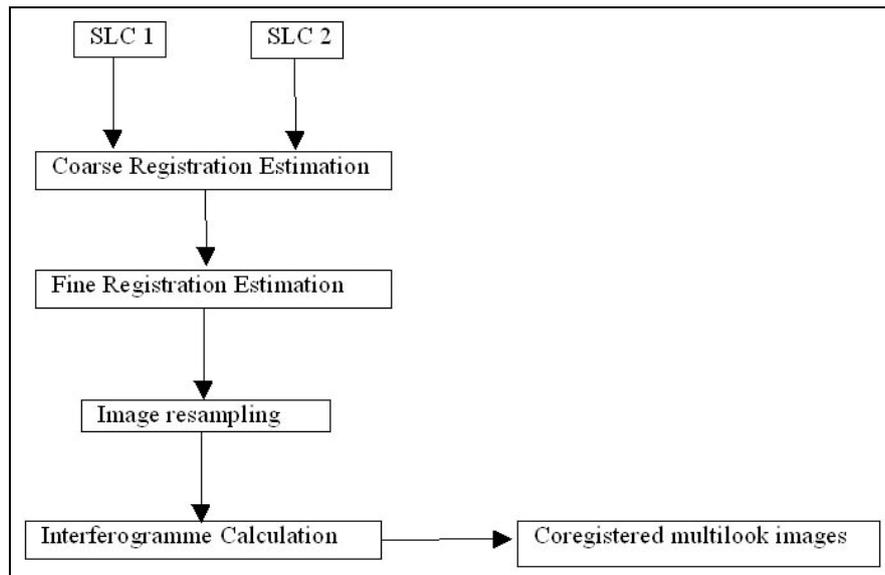


Figura 65. Schema di calcolo dell'interferogramma.

Il diagramma in alto mostra i passaggi principali relativi alla generazione dell'interferogramma (guida SARSCAPE - SARMAP 2008).

6. Filtraggio dell'interferogramma e generazione della mappa di coerenza: questo passaggio permette di ridurre il noise “lisciando” l'interferogramma differenziale prima della successiva fase di “unwrapping” (srotolamento della fase). Durante questo step si genera anche la carta di coerenza relativa alla coppia elaborata;

7. Phase unwrapping: la fase dell'interferogramma è conosciuta a meno di multipli di 2π . L'operazione che permette di derivare il valore assoluto della fase e che risolve questa ambiguità è conosciuto come “srotolamento dell'interferogramma differenziale” o “unwrapping”:

$$\phi_u = \phi_w + 2N\pi \quad \text{essendo :} \quad (4.1)$$

- ϕ_u = fase unwrapped;

- ϕ_w = fase wrapped ;
- N = numero intero da calcolare.

L'output è l'immagine di fase assoluta, relativa ai punti in cui la coerenza risulta superiore a una soglia di riferimento. L'immagine prodotta è ancora rappresentata nella direzione di vista del satellite (*slant range*). Essa è funzione geometrica della quota e il valore dei suoi pixel è fornito in radianti. Esistono numerosi algoritmi di unwrapping. Quello che è stato utilizzato in questa analisi è il “*region growing*” (Reigber et al., 1997);

8. Baseline fit: questa fase è di particolare importanza per correggere gli errori relativi ai dati orbitali dei satelliti, che quasi sempre affliggono la qualità e la bontà dei prodotti interferometrici e di conseguenza la corretta trasformazione delle informazioni di fase in valori di quota. L'esecuzione di questo step, presuppone l'identificazione sull'immagine di punti di controllo. Questi devono essere piazzati sulle immagini evitando di creare singolarità e dove le frange topografiche sono state eliminate dal processo di “*flattening*”;

9. Reiterazione del processo dal punto 4 al punto 7: per quello che concerne la generazione di carte di deformazione dopo l'esecuzione della correzione dei dati orbitali con la “*baseline fit*”, SARscape prevede la reiterazione della procedura dal punto 4 al 7 utilizzando i dati orbitali corretti. L'ultima versione del software prevede una procedura automatizzata più semplice per la reiterazione che precedentemente doveva essere eseguita a mano;

10.1 Phase to map: questo rappresenta l'ultimo passaggio del processing per la produzione di Modelli Digitali di Superficie. I valori di fase assoluta calibrati e “srotolati” sono convertiti in quote e direttamente geocodificati;

10.2 Phase to displacement: i valori di fase assoluta calibrata e “srotolata” sono convertiti in spostamento e direttamente geocodificati nella proiezione desiderata. Le equazioni “Range-Doppler” sono applicate simultaneamente alle due antenne, permettendo così di ottenere non solo lo spostamento di ogni pixel, ma anche la relativa posizione (Easting, Northing) in un sistema di riferimento geocartografico. È possibile specificare un vettore (es. direzione e inclinazione) su cui lo spostamento lungo la *slant range direction* sarà proiettato. Tipicamente, questo vettore rappresenta la direzione di deformazione al suolo (verticale nel caso di subsidenze; secondo la linea di massima pendenza nel caso di movimenti di versante).

L'operazione può essere eseguita solo fornendo punti di controllo (GCP) a terra individuati preventivamente. Questi (GCP) sono utilizzati per calcolare e rimuovere l'offset di fase. Essi possono essere localizzati sia su aree a deformazione conosciuta (punti GPS di monitoraggio) o dove non esiste deformazione (spostamento).

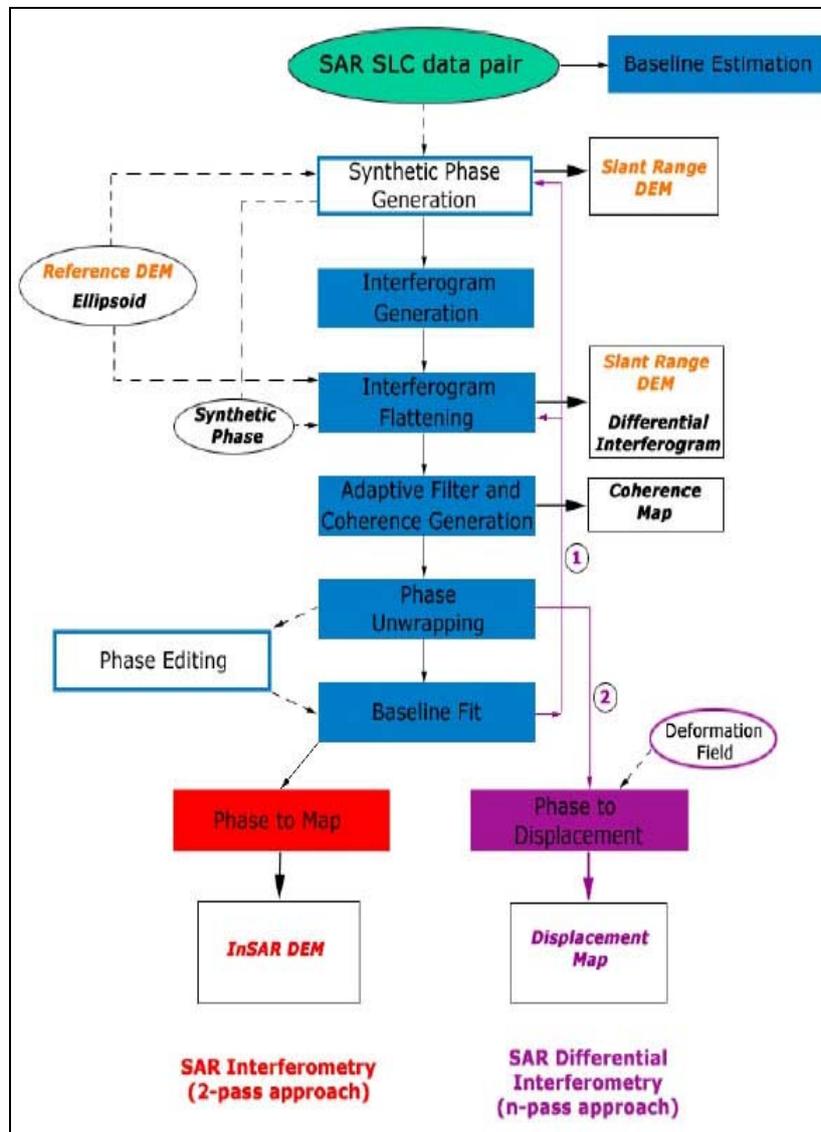


Figura 66. Insieme della catena di processing implementata in SARscape (guida SARSCAPE - SARMAP 2008).

4.2.2 Algoritmo di separazione delle differenti componenti della fase interferometrica.

La decorrelazione temporale, dovuta principalmente a variazioni delle caratteristiche fisiche e atmosferiche, determina un abbassamento della coerenza interferometrica e dunque la

presenza di noise nel valore della fase dell'interferogramma relativo ad un determinato pixel. Esistono tuttavia punti caratterizzati da coerenza elevata, con caratteristiche costanti nel tempo che possono essere definiti come “*riflettori stabili*”. Essi mantengono costante nel tempo il valore di fase interferometrica del segnale retrodiffuso (Ferretti et al., 1999). Dunque, l'atmosfera, come la deformazione superficiale, contribuisce a far variare il valore di fase interferometrica. Altre perturbazioni derivano, per esempio, dal noise introdotto dal sistema SAR nel processo stesso di elaborazione del segnale o dovuto ad errori di vario genere.

Nella seconda parte di questa tesi si è avuto a disposizione un software sviluppato dal Dipartimento di Geofisica della Litosfera dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica di Trieste (OGS), basato su un algoritmo studiato per arrivare alla separazione delle tre componenti della fase interferometrica dovute rispettivamente al movimento, all'atmosfera e al noise. L'utilizzo di questo tool ha permesso l'ottimizzazione dei risultati ottenuti con SARscape. Difatti, consentendo l'utilizzo di tutte le immagini a nostra disposizione, alcune delle quali precedentemente scartate perché affette da perturbazioni varie, ha consentito una migliore modellizzazione dei fenomeni osservati. Inoltre, gli innumerevoli test effettuati nel corso di questo lavoro, anche su aree esterne a quella di studio (Parigi: Gare de Saint-Lazare; Calabria: Belvedere Spinello), (G. Fortunato et al., 2007, 2008), ha permesso allo stesso OGS di continuare il lavoro di validazione di uno strumento comunque ancora sperimentale. *In ogni caso, seppur si sono identificati sia bug che potenziali interessanti sviluppi dell'algoritmo in questione, nel corso del lavoro di ricerca si è sempre voluto rimanere nell'ambito della sua validazione e del software su esso sviluppato, non investendo sul suo sviluppo.* I paragrafi che seguono sono derivati essenzialmente dal lavoro di Massimo DEAN (2002) nel corso del quale sono state sviluppate ed implementate in un software le parti teoriche dell'algoritmo.

Basi teoriche dell'algoritmo di separazione.

La fase interferometrica è data dal contributo di tre termini (Ferretti et al., 1999):

$$\phi_{\text{int}} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot R_{\text{target}} + \phi_{\text{atmosphere}} + \phi_{\text{noise}} \quad (4.2)$$

essendo :

- $\frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot R_{\text{target}}$ = contributo del valore di fase derivato dal movimento del target ;

- $\phi_{atmosphère}$ = contributo del valore di fase derivato dall'atmosfera ;
- ϕ_{noise} = contributo del valore di fase derivato dal noise.

Il termine di fase derivato dal movimento può essere riscritto nel modo seguente :

$$\frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot R_{target} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot V_{target} \cdot T + N_{non_linear} = C \cdot V_{target} + N_{non_linear} \quad (4.3)$$

essendo:

- V_{target} = velocità di spostamento del target ;
- T = intervallo di tempo tra due acquisizioni;
- $C = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot T$ = costante;
- N_{non_linear} = contributo alla fase derivato dallo spostamento non lineare del target.

Analogamente anche il termine di fase derivato dal contributo atmosferico può essere riscritto nel modo seguente :

$$\phi_{atmosphere} = \phi_{linear_atmosphere} + \phi_{non_linear_atmosphere} \quad (4.4)$$

essendo:

- $\phi_{linear_atmosphere}$ = contributo lineare di fase derivato dall'atmosfera ;
- $\phi_{non_linear_atmosphere}$ = contributo non lineare alla fase derivato dall'atmosfera.

Dunque, sia il termine di fase dovuto allo spostamento del target, sia quello dovuto all'atmosfera, possono essere suddivisi in una componente lineare ed in una non lineare. Lo stesso noise costituisce una contribuzione non lineare ai valori di fase. Dunque nell'equazione 4.2, la fase interferometrica può essere così espressa:

$$\phi_{int} = (C \cdot V_{target} + \phi_{linear_atmosphere}) + (N_{non_linear} + \theta_{non_linear_atmosphere} + \phi_{noise}) = \phi_{linear} + \phi_{non_linear} \quad (4.5)$$

Il valore di fase interferometrica è composto sia da un termine lineare (dovuto allo spostamento del bersaglio e alle variazioni lineari dovute all'atmosfera), sia da un termine non lineare (dovuto allo spostamento non lineare del target, alle variazioni non lineari dell'atmosfera e al noise).

L'algoritmo di separazione è stato dunque articolato fondamentalmente in due fasi:

1. Separazione della componente non lineare dalla componente lineare della fase atmosferica;
2. Separazione della componente lineare dovuta al movimento dalla componente lineare dovuta all'atmosfera.

Esso sfrutta due tipi di dati : la fase e la coerenza interferometrica. Di conseguenza, nel seguito della presentazione, faremo riferimento ad esse denominandole rispettivamente matrice di fase (phase matrix) $\mathbf{M}_{\text{phase}}$ e matrice di coerenza (coherence matrix) $\mathbf{M}_{\text{coherence}}$. Tutte le matrici derivate hanno le stesse dimensioni della matrice di partenza.

Separazione della componente lineare della fase interferometrica da quella non lineare.

Nella matrice di coerenza vengono isolati i valori di coerenza più alti, corrispondenti cioè ai riflettori più stabili presenti sulla zona. Deve essere fissato un valore di riferimento per la coerenza da utilizzare per effettuare il confronto : fattore di coerenza (coherence factor) γ_f . Tutti i valori presenti nella matrice di coerenza inferiore a γ_f sono scartati, mentre quelli superiori a questo vengono inseriti in una nuova matrice (mantenendo la stessa posizione che avevano nella matrice di partenza), denominata matrice di coerenza accettata (accept coherence matrix) $\mathbf{M}_{\text{accept_coherence}}$. Questa nuova matrice è una matrice sparsa, cioè costituita da elementi “ vuoti ”, corrispondenti ai termini scartati. Dal punto di vista operativo, per poter essere efficacemente utilizzata nelle operazioni successive, i valori diversi da quelli “ vuoti ” presenti in tale matrice sono stati posti uguali a 1 (normalizzazione della matrice). Successivamente a partire dalla matrice di fase sono stati estratti tutti i valori corrispondenti in termini di linee e colonne ai valori uguali a 1 presenti nella matrice di coerenza accettata. Il risultato è una nuova matrice di fase, sparsa come quella di coerenza accettata (con lo stesso numero di elementi), detta matrice di fase accettata (accept phase matrix) $\mathbf{M}_{\text{accept_phase}}$. La matrice ottenuta contiene il valore di fase in corrispondenza di un riflettore permanente. Questa fase comprende, come anticipato, sia un termine lineare che uno non lineare. A questo punto la matrice di fase accettata è progressivamente analizzata in aree di dimensioni opportune, attraverso una “finestra” di più piccole dimensioni nominata finestra di scanning (scanning window). Di tutti gli elementi in essa contenuti (diversi dai No Data) è stata calcolata la media η e la varianza σ così definite:

$$\eta = \frac{\sum_i w_i}{N} \quad (4.6)$$

$$\sigma = \frac{\sum_i (w_i - \eta)^2}{N - 1} \quad (4.7)$$

La finestra di scanning ha caratteristiche ben precise: è quadrata e la sua dimensione, definita da un numero intero, è sempre dispari, (Figura 67).

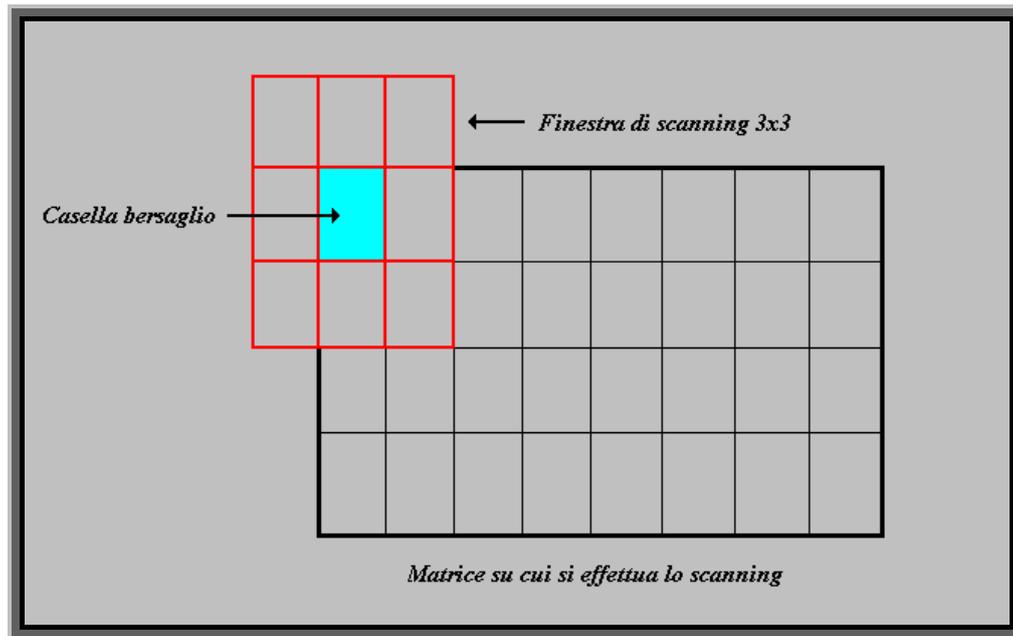


Figura 67 . Utilizzo della finestra di scanning.

Una finestra di scanning è analoga a una matrice quadrata di ordine n . Se n è un numero intero dispari, in tale matrice è sempre presente una casella centrale, denominata **casella bersaglio** (target case). Supponiamo di scegliere, come in figura, la finestra di scanning con la casella obiettivo in corrispondenza del primo elemento della matrice accettata. Una volta calcolato il valore medio e la varianza degli elementi in essa contenuti, tali valori sono stati ricollocati in due nuove matrici: la matrice media (mean matrix) \mathbf{M}_{mean} , (per il valore medio) e la matrice di varianza (variance matrix) $\mathbf{M}_{\text{variance}}$, (per la varianza). Naturalmente tali valori sono stati collocati nella stessa posizione degli elementi della matrice di fase accettata sui cui è piazzata la casella bersaglio. Questa operazione è ripetuta per tutti gli elementi della matrice. Queste due nuove matrici hanno un significato molto importante. In effetti, la varianza così calcolata misura la dispersione dei valori di fase, contenuti nella finestra di scanning, intorno al valore medio.

Questa dispersione è dovuta alla non linearità del movimento e all'atmosfera oltre naturalmente al noise, che caratterizzano la componente non lineare della fase interferometrica. **Dunque se la varianza assume dei valori molto piccoli, tale componente sarà anch'essa piccola e il valore medio dei valori di fase interferometrica contenuti nella finestra di scanning rappresenterà la componente lineare di tutti i valori di fase compresi all'interno di tale finestra (Williams et al., 1998).** Normalmente, per questa operazione di scanning, è utilizzata una finestra di dimensioni ridotte, poiché la dispersione della fase dovuta al noise è piccola solamente per zone dimensionalmente limitate dell'interferogramma. È utile osservare che la dimensione della finestra di scanning è limitata inferiormente a 3, mentre teoricamente non ci sono limiti superiori, (Figura 67). Sulla matrice di varianza bisogna svolgere la stessa operazione che porta alla creazione della matrice di coerenza accettata, fissando un valore di riferimento per la varianza: fattore di varianza (variance factor) σ_f . Tutti i valori superiori a σ_f sono scartati, mentre quelli inferiori sono inseriti in una nuova matrice denominata matrice di varianza accettata (accept variance matrix) $\mathbf{M}_{\text{accept_variance}}$. Anche questa nuova matrice è una matrice sparsa e deve essere normalizzata come la matrice di coerenza accettata. Per quello che concerne la matrice media, questa viene trattata come la matrice di fase. Moltiplicata, elemento per elemento, con la matrice di varianza accettata, ottenendo la matrice media accettata (accept mean matrix) $\mathbf{M}_{\text{accept_mean_matrix}}$. A questo punto l'algoritmo procede con l'interpolazione dei valori di matrice media accettata. Il metodo implementato è l'interpolazione a due dimensioni di Delaunay. Interpolando con questa tecnica la matrice media accettata si ottiene una nuova matrice, non sparsa, che indicheremo con il nome di matrice interpolata (interpolated matrix) $\mathbf{M}_{\text{interpolated}}$. La matrice interpolata sarà moltiplicata, elemento per elemento, con la matrice di coerenza accettata. I dati contenuti nella matrice risultante saranno le componenti lineari dei valori di fase in corrispondenza dei riflettori permanenti. Questa nuova matrice è la matrice lineare (linear matrix) $\mathbf{M}_{\text{linear}}$. A questo punto del processing bisogna sottrarre alla matrice di fase accettata la matrice lineare ottenuta. I dati contenuti nella matrice risultante saranno le componenti non lineari dei valori di fase in corrispondenza dei riflettori permanenti. Questa nuova matrice è la matrice non lineare (non linear matrix) $\mathbf{M}_{\text{non_linear}}$. Con questo procedimento si arriva a risolvere la nostra prima operazione e cioè la separazione della componente lineare della fase interferometrica dalla componente non lineare.

Separazione della componente lineare dovuta al movimento dalla componente lineare dovuta all'atmosfera.

La separazione della componente lineare della fase interferometrica dovuta al movimento del terreno da quella dovuta all'atmosfera è sicuramente la parte più critica dell'algoritmo. In effetti, il metodo utilizzato è concettualmente semplice, ma sono necessarie delle considerazioni a priori, riferiti ai dati di partenza, al fine di ottenere una separazione sufficientemente corretta. Consideriamo due casi in particolare:

a) Immagini acquisite a grande distanza di tempo (dell'ordine di qualche anno).

In uno spazio temporale così grande, l'atmosfera deve aver variato numerose volte le sue caratteristiche, ma è statisticamente improbabile che si sia concentrata principalmente in qualche punto della zona investigata. Dunque il suo contributo alla componente lineare della fase interferometrica sarà probabilmente la stessa in ogni punto dell'interferogramma. Si immagina che il contributo dovuto al movimento sia forte, poiché in un periodo così lungo è probabile che il terreno si sia spostato in maniera apprezzabile, (Figura 68).

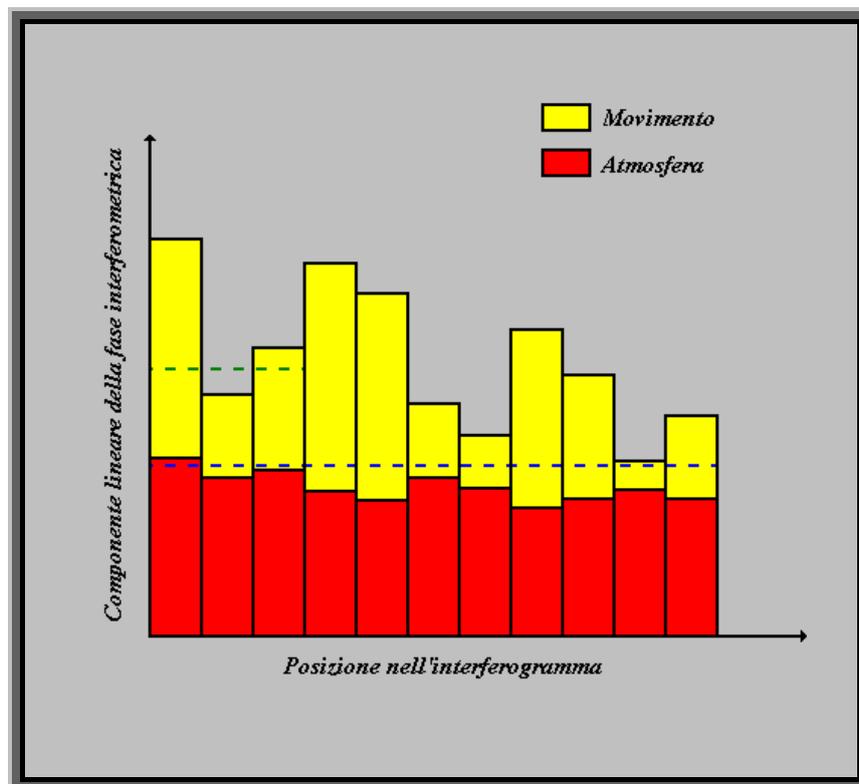


Figura 68 . Componente lineare della fase interferometrica su immagini acquisite a grande distanza di tempo.

Nell'immagine è rappresentata l'andamento della componente lineare della fase interferometrica lungo una direzione dell'interferogramma (il caso a due dimensioni si deduce di conseguenza). Per semplicità di trattazione i valori di fase rappresentati sono tutti positivi, ma evidentemente possono essere anche negativi. Si suppone di calcolare il valore medio della componente di fase lineare con una finestra di scanning di grandi dimensioni ; tale valore sarà rappresentato dalla linea tratteggiata in blu e approssimerà molto bene il termine della componente lineare di fase dovuto all'atmosfera (messa in evidenza in rosso). D'altra parte, se impiegassimo una finestra di scanning di piccole dimensioni, il valore medio, (linea verde) si discosterebbe considerevolmente dal termine di fase atmosferica, e la nostra separazione risulterebbe imprecisa.

b) Immagini acquisite a breve distanza di tempo (dell'ordine di giorni):

In un periodo di tempo breve, è statisticamente probabile che l'atmosfera si sia concentrata principalmente in alcune zone dell'immagine investigata, dando dunque un forte contributo alla componente lineare della fase interferometrica. D'altra parte il terreno non può essersi spostato in maniera apprezzabile in così poco tempo (a meno di avvenimenti eccezionali). Dunque il contributo del movimento alla componente lineare della fase interferometrica potrebbe essere nullo, (Figura 69).

Il suo significato è analogo a quello della figura precedente, ma questa volta il contributo del movimento alla componente lineare della fase interferometrica è considerevolmente ridotto. Si suppone di calcolare nuovamente il valore medio della componente della fase lineare, ma utilizzando una finestra di scanning di piccole dimensioni; tale valore sarà rappresentato dalla linea blu e ancora una volta approssimerà molto bene il termine dovuto all'atmosfera (messo in evidenza in rosso). D'altra parte, in qualche circostanza, l'atmosfera può variare rapidamente (per esempio ai margini di zone soggette a fenomeni temporaleschi). In tali zone la separazione del movimento dall'atmosfera risulterà molto difficile, poiché il valore medio (rappresentato dalla linea verde) non approssimerà sufficientemente bene il termine atmosferico presente nella componente lineare della fase interferometrica. Le due situazioni esaminate rappresentano dei casi estremi. Appare chiaro che non esistono delle regole generali, circa le dimensioni della finestra di scanning da utilizzare, per un'ottimale separazione del movimento dall'atmosfera.

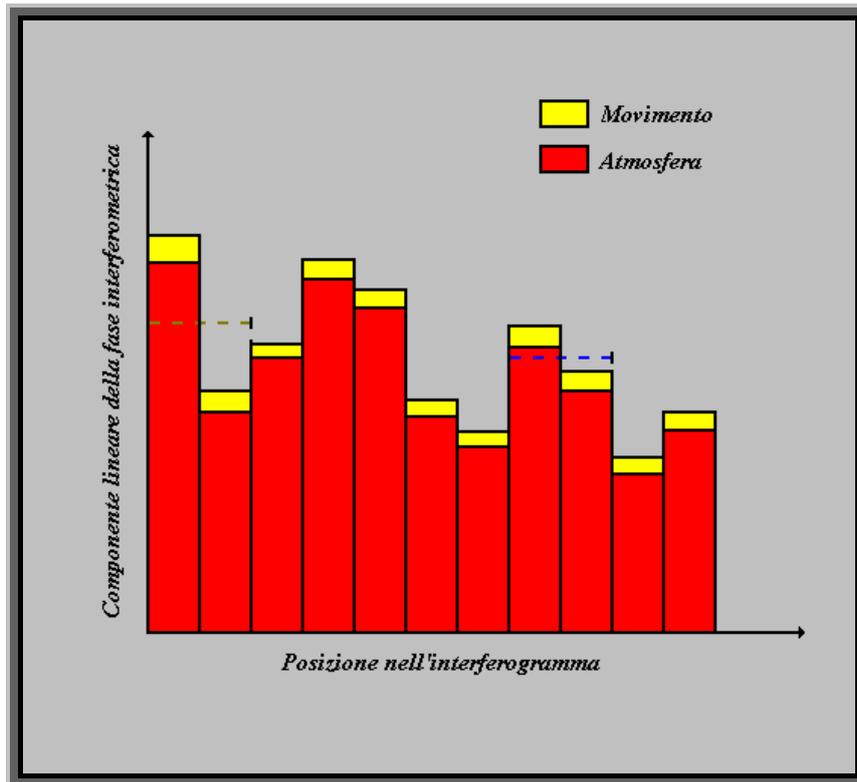


Figura 69 . Componente lineare della fase interferometrica per immagini acquisite a breve distanza di tempo.

Nella prima situazione, per esempio, utilizzare finestre di scanning troppo piccole porterebbe ad una contaminazione della componente atmosferica nei riguardi della componente dovuta al movimento, mentre nel secondo caso, utilizzando finestre troppo grandi, avverrebbe il contrario. Una volta fissate, secondo le esigenze, le dimensioni della finestra, il tool prevede l'operazione di scanning sulla matrice lineare, ottenendo così la matrice lineare media (linear mean matrix) $M_{\text{linear_mean}}$. Questa deve essere moltiplicata, elemento per elemento, con la matrice di coerenza accettata, ottenendo così la matrice dell'atmosfera (atmosphere matrix) $M_{\text{atmosphere}}$. Quest'ultima rappresenta il contributo lineare ai valori di fase dovuti alla sola atmosfera. Sottraendo alla matrice lineare la matrice dell'atmosfera si ottiene la matrice di velocità (velocity matrix) M_{velocity} . Essa rappresenta il contributo lineare ai valori di fase dovuti al solo movimento:

$$M_{\text{velocity}} = M_{\text{linear}} - M_{\text{atmosphere}} \quad (4.8)$$

Questa matrice subirà il processo di *unwrapping*, in modo analogo alla matrice non lineare. I valori di fase contenuti in questa matrice non rappresentano tuttavia la velocità reale dello spostamento del bersaglio a terra. Quest'ultima può essere ottenuta attraverso l'equazione:

$$V_{target} = \phi_{velocity} \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\lambda}{T} \quad (4.9)$$

essendo:

- $\phi_{velocity}$ = valori di fase contenuti nella matrice di velocità ;
- λ = lunghezza d'onda del sistema SAR ;
- T = intervallo di tempo tra le due acquisizioni.

Finalmente si può ottenere a partire dalla matrice di velocità, una nuova matrice, detta matrice della velocità reale (real velocity matrix) $M_{real_velocity}$, che rappresenterà la reale velocità di spostamento del bersaglio individuato sulla superficie. Una sintesi dei passaggi esposti è riportata in Figura 70 .

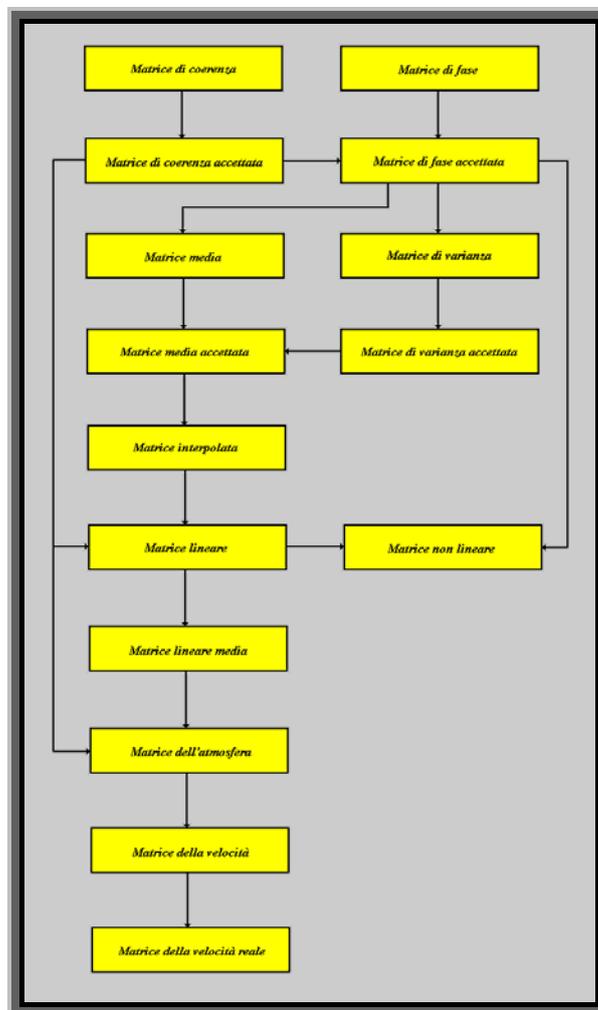


Figura 70. Separazione delle tre componenti della fase interferometrica.

4.2.3 Il software SHISSOR

Il programma SHISSOR è stato concepito con lo scopo di fornire un mezzo che permettesse un'utilizzazione semplice e intuitiva dell'algoritmo di separazione. Il programma è stato sviluppato in ambiente Windows tramite il compilatore Visual C ++ e utilizzando anche le librerie OpenGL per la rappresentazione grafica delle matrici. Senza analizzarlo nel dettaglio se ne riportano le principali caratteristiche. L'interfaccia, attualmente, consente di scegliere tra differenti operazioni di calcolo: Phase Separation, Moisture o ILU Classification che implicano l'inserimento dei relativi dati utili al processamento, (tabella 4.1).

	Phase Matrix	Coherence Matrix	Amplitude1 Matrix	Amplitude2 Matrix	Coherence Factor	Variance Factor	Linear Scanning Window Size	Atmosphere Scanning Window Size	Wave Length	Time Delay
Phase Separation	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Moisture	NO	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
ILU Classification	NO	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Tabella 4.1 Dati da inserire in funzione del tipo di operazione da svolgere.

I parametri fondamentali utilizzati in SHISSOR per l'elaborazione dei valori di fase interferometrica sono riportati di seguito con i valori relativi utilizzati nel corso dello studio ovviamente dipendenti dalle dimensioni delle matrici di calcolo utilizzate:

- Coherence Factor: questo parametro è utilizzato per scartare i valori di fase interferometrica in corrispondenza dei valori di coerenza inferiori a tale limite. Il valore utilizzato per l'elaborazione è stato compreso essenzialmente tra 0.35 e 0.55;
- Variance Factor: questo parametro è utilizzato per scartare i valori medi di fase interferometrica (calcolati all'interno della finestra di stima per la separazione tra componente lineare e componente non lineare di fase interferometrica) in corrispondenza dei valori di varianza analogamente calcolati inferiori a tale limite. Il valore utilizzato nell'elaborazione è pari a 0.01 rad.
- Linear Scanning Window Size: calcola il valore medio e la varianza della fase interferometrica per la separazione del contributo lineare/non lineare di fase interferometrica. Il valore utilizzato per l'elaborazione è stato fatto variare tra 5 e 17 pixels.
- Atmosphere Scanning Window Size: calcola il valore medio dei valori di fase interferometrica che costituiscono il contributo lineare per la separazione del contributo spostamento/atmosfera di fase interferometrica. Il valore utilizzato per l'elaborazione è stato variabile tra 17 e 39 pixels.
- Wave Length: lunghezza d'onda del sistema. Con la baseline temporale trasforma i valori di fase interferometrica dovuti allo spostamento del terreno in valori di velocità del terreno.

- Temporal Baseline: baseline temporale che caratterizza l'interferogramma (intervallo di tempo tra le due acquisizioni).

Nella prima fase dell'elaborazione il programma SCISSOR separa il contributo lineare alla fase interferometrica da quello non lineare, (tabella 4.3):

Si accettano i valori di coerenza superiori al “ coherence factor ”.
Si accettano i valori di fase interferometrica in corrispondenza dei valori di coerenza accettati.
Si calcola la media e la varianza dei valori di fase accettata all'interno del “ linear scanning windows ”.
Si accettano i valori di varianza inferiori al “ variance factor ” e i valori medi in corrispondenza dei valori di varianza accettata.
Si interpolano i valori medi accettati con l' algoritmo di Delaunay accettando quelli in corrispondenza dei valori di coerenza accettata ottenendo così il “ contributo lineare alla fase interferometrica ”.
Sottraendo ai valori di fase accettata il contributo lineare alla fase interferometrica si ottiene il “ contributo non lineare alla fase interferometrica ” dovuto al “ noise ” ed alla non linearità dell'atmosfera e del movimento del terreno.

Tabella 4.2. Separazione del contributo lineare alla fase interferometrica da quello non lineare.

Nella seconda fase dell'elaborazione il contributo lineare alla fase interferometrica dovuto all'atmosfera viene separato da quello dovuto al movimento del terreno, (tabella 4.4):

Si calcola la media del contributo lineare alla fase interferometrica all'interno della “ atmosphere scanning windows ”.
I valori medi sopra calcolati in corrispondenza dei valori di coerenza accettata costituiscono il “ contributo alla fase interferometrica dovuto all'atmosfera ”.
Sottraendo al contributo lineare alla fase interferometrica il contributo dovuto all'atmosfera si ottiene il “ contributo alla fase interferometrica dovuto al movimento del terreno ”.
Si trasforma il contributo alla fase interferometrica dovuto al movimento del terreno in valori di deformazione ottenendo una “ mappa di deformazione del terreno ”.

Tabella 4.3. Separazione del contributo lineare alla fase interferometrica dovuto all'atmosfera da quello dovuto al movimento del terreno.

Al termine del processo d'elaborazione, per ciascun sito di studio e per ciascun accoppiamento SAR, relativamente ai pixels 20x20m con fattore di coerenza > 0.35 , il programma SCISSOR produce una mappa di contributo atmosferico alla fase interferometrica, una mappa di velocità di spostamento del terreno in linea di vista del satellite e una mappa di spostamento del terreno in linea di vista del satellite (espressa in mm).

L'intero processo illustrato non è stato sperimentato sulla totalità degli interferogrammi prodotti perché il tool in questione è stato acquisito solo nella seconda metà del lavoro di tesi.

4.2.4 Prodotti di classificazione tipo ILU (Interferometric Land Use)

I prodotti ILU (Interferometric Land Use) derivano dalla classificazione degli oggetti presenti sul territorio derivata dall'utilizzo dei tre colori di base (rosso, verde e blu). Con essi possono essere gestite le immagini digitali, per rappresentare (rappresentazione RGB, Figura 71) in maniera visivamente efficace tre differenti tipi di elementi: le abitazioni e i terreni brulli o con vegetazione scarsa, quelle a vegetazione media boschi e foreste, le superfici d'acqua (Borgeaud e Wegmuller, 1996; Askne e Hagberg, 1993; Hagberg et al., 1993).

<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Result</i>
<i>1</i>	\emptyset	\emptyset	
\emptyset	<i>1</i>	\emptyset	
\emptyset	\emptyset	<i>1</i>	
<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	
\emptyset	\emptyset	\emptyset	

Figura 71. Rappresentazione dei colori in formato RGB.

I software precedentemente illustrati sono stati sviluppati per poter effettuare anche questo tipo di operazione. I dati normalmente utilizzati saranno la coerenza e le ampiezze degli impulsi riflessi nelle due acquisizioni.

Quindi, oltre a quelle relative all'ampiezza del segnale retrodiffuso ed alla coerenza, già generate durante il normale processamento interferometrico, per realizzare questo tipo di classificazioni è necessario derivare anche nuove matrici. La prima è data dal valore medio delle ampiezze dell'impulso riflesso chiamata matrice di ampiezza media (mean amplitude matrix). La seconda dalla differenza di ampiezza del segnale retrodiffuso nelle due acquisizioni, in valore assoluto,

denominata matrice di differenza di ampiezza (difference amplitude matrix). L'affidabilità della classificazione ILU si basa sui concetti di seguito esposti.

La coerenza cambia considerevolmente secondo la natura del bersaglio a cui essa fa riferimento. Nel caso di edifici o di campi con scarsa vegetazione la coerenza è elevata, mentre essa diminuisce nel caso di aree a densa vegetazione fino a quasi annullarsi sopra i laghi o il mare. Anche l'ampiezza del segnale riflesso presenta la stessa variabilità, come il coefficiente di riflettività del bersaglio. Gli edifici, per esempio, riflettono sempre una grande parte del segnale verso l'antenna, in modo tale che l'ampiezza media tra le due acquisizioni è sempre elevata, mentre la differenza dei valori è quasi nulla. Comportamento opposto presentano le zone d'acqua, che riflettono quasi tutta l'energia degli impulsi lontano dall'antenna trasmittente ; tuttavia la superficie dell'acqua è molto instabile, soggetta cioè a continui movimenti ed increspature dovute al vento o al moto ondoso, perciò la differenza dei valori di ampiezza fra le due acquisizioni sarà probabilmente elevata. Le zone a densa vegetazione presentano invece un comportamento intermedio, (tabella 4.5).

	Coerenza	Ampiezza media	Differenza d'ampiezza
Edifici e terreni a bassa vegetazione	Alta	Alta	Bassa
Foreste o zone a vegetazione medio/alta	Media	Media	Media
Zone d'acqua (laghi, mari)	Bassa	Bassa	Alta

Tabella 4.4. Stima del grado di coerenza, di ampiezza media e di differenza di ampiezza per le diverse tipologie di oggetti presenti sul territorio in esame.

Se ora si attribuisce ai valori della matrice di coerenza il colore rosso, alla matrice di ampiezza media il colore verde e alla matrice di differenza di ampiezza il colore blu, gli edifici e i terreni a vegetazione scarsa risulteranno colorati in arancione chiaro o in bianco, mentre le zone d'acqua appariranno in blu scuro o in nero. Le foreste e le zone a vegetazione più o meno densa, avendo un comportamento intermedio, appariranno in verde. La classificazione ILU è quindi un metodo semplice per avere una visione d'insieme delle caratteristiche del territorio esaminato. Tuttavia bisogna tenere presente che tale metodo può essere applicato solo a immagini acquisite a distanza di tempo molto breve l'una dall'altra, poiché il comportamento delle tre tipologie di oggetti, riassunto nella tabella precedente, varia a seconda delle stagioni. In inverno, infatti, la

riflettività della vegetazione è ridotta a causa della perdita delle foglie, mentre quella dell'acqua aumenta per la formazione di ghiaccio sulla superficie dei laghi.

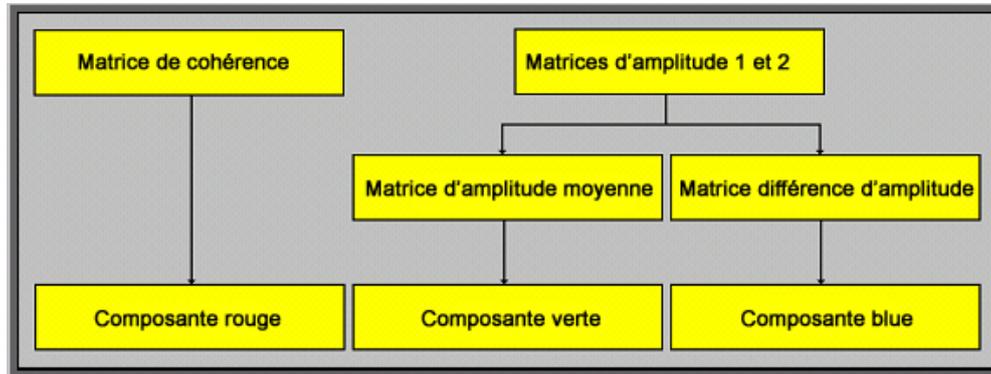


Figura 72. Fasi principali della classificazione di tipo ILU implementate nell'algorithm di separazione ed in SHISSOR.

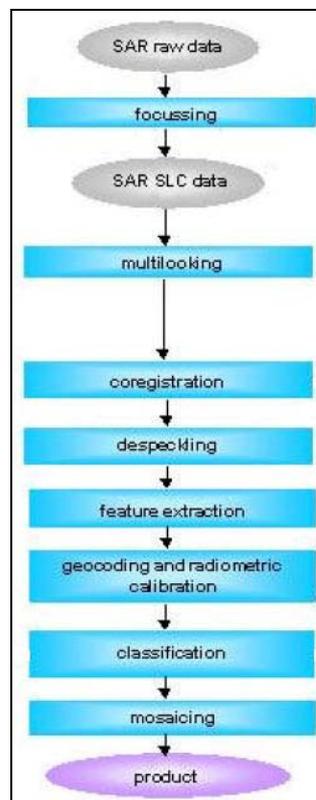


Figura 73. Insieme della catena di processamento implementata in SARscape e utilizzata per la produzione di cartografia ILU.

4.4 Conclusioni

Durante i test effettuati sulle prime immagini SAR a disposizione sono stati sperimentati differenti programmi *open-source* di elaborazione di immagini radar derivate da sensori satellitari. Principalmente il *Doris Insar processor* sviluppato dal Delft Institute of Earth Observation and Space Systems della Delft University of Technology in Olanda (<http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/>). Finalmente, la disponibilità di una licenza del software SARscape ci ha fatto optare per questa soluzione di elaborazione vista la sua diretta integrazione sulla piattaforma IDL-ENVI. Il software attualmente risulta essere una soluzione modulare integrale per questo tipo di lavoro consentendo l'analisi completa (interferometria differenziale, polarimetria, analisi qualitative sul modulo, Persistent Scatterers) di dati SAR derivati dai più svariati sensori. La sua versione attuale è molto diversa da quella disponibile all'inizio del lavoro. La società di sviluppo, nell'intento di migliorare il tool (anche attraverso indicazioni fatte nell'ambito di questo lavoro) ci ha obbligato a variare diverse volte la sequenza di analisi. Successivamente, durante uno stage formativo all'OGS di Trieste, è stato acquisito il software SHISSOR. Questo strumento di analisi, sviluppato per "generare e filtrare" prodotti interferometrici DInSAR, è apparso potenzialmente interessante per applicazioni su aree come quella oggetto del nostro studio. I ricercatori dell'OGS hanno voluto fornirci una copia del software al fine di una sua ulteriore validazione. Durante il lavoro, lo stesso è stato testato su aree a deformazione nota (Gare de Saint Lazare – Parigi, miniera di Belvedere Spinello – Crotone) e con immagini affette da importanti perturbazioni atmosferiche. I risultati, molto incoraggianti, ci hanno spinto ad un suo utilizzo sull'area specifica di studio. Oltre al suo utilizzo nella tesi ed alla redazione di nuovi lavori di ricerca, la collaborazione istituita con l'OGS di Trieste potrà essere mirata ad un ulteriore sviluppo del software. Questo potrebbe permettere l'utilizzo completo della banca dati di immagini ESA, spesso ridotta dall'eliminazione di immagini con forti perturbazioni atmosferiche, e lo studio di deformazioni su periodi in cui non sono disponibili coppie di immagini SAR non perturbate. Entrambi i software permettono inoltre di generare mappe di classificazione qualitativa del territorio di tipo ILU. Finalmente, la metodologia impiegata e l'utilizzo integrato dei due software citati, come è illustrato nel corso del lavoro, ha rappresentato una buona soluzione per studi come quello affrontato nel corso di questa ricerca.

Capitolo 5. Prodotti derivati dal “processing” DInSAR

Di seguito sono illustrati i prodotti direttamente derivati dall’elaborazione dei dati SAR. Dopo la presentazione di alcune specificità sono mostrati i risultati principali del processamento: gli interferogrammi in geometria slant range e relativi alle specifiche aree oggetto della ricerca. Successivamente, al fine di provare la versatilità dei dati SAR nella generazione di “*prodotti accessori*” di supporto all’osservazione del territorio, due paragrafi sono dedicati all’illustrazione dei risultati ottenuti nella generazione di Modelli Digitali di Superficie e di cartografia tematica utile alla classificazione. Si è voluto praticamente dimostrare come con l’acquisizione di sole immagini SAR possono essere derivati sia dati quantitativi come mappe di deformazione del suolo e modelli digitali di superficie che qualitativi utili ad operazioni di classificazione degli oggetti presenti sul territorio.

Relativamente alle mappe di deformazione, la messa a punto di una procedura che ha consentito l’uso integrato dei software SARscape e SHISSOR è risultato essere un approccio sicuramente originale per la derivazione di informazione da interferogrammi che in altre situazioni non sarebbero stati investigati. Ciò ha consentito lo sfruttamento completo della banca dati che si è avuta a disposizione. Le prime informazioni fornite dalle mappe di deformazione seppur in geometria slant range costituiscono a oggi osservazioni inedite per le aree di studio. La possibilità di integrare questi ultimi con i Modelli Digitali di Superficie e i dati generali di classificazione del territorio originati dallo stesso sensore costituisce l’unico approccio di questo tipo fatto, ad oggi, per il territorio calabrese.

5.1 Specifiche del processing effettuato

Gli interferogrammi sono stati realizzati essenzialmente attraverso l’utilizzo dei software SARscape e SHISSOR. La totalità delle immagini disponibili per l’analisi avrebbero consentito la realizzazione di più di 370 interferogrammi. Naturalmente, la ricerca della minimizzazione dei problemi soprattutto legati alla perdita di coerenza, ha spinto all’individuazione delle combinazioni che presentavano valori di baseline inferiori ai 100 m. Sono stati così realizzati:

- 97 interferogrammi per le immagini ERS (44 - track 451, frame 2835; 48 - track 451, frame 2817; 5 – track 451, frame 2825);

- 7 interferogrammi per le immagini ENVISAT (track 451, frame 2825).

Anche se il numero di interferogrammi appare importante, essi sono stati realizzati definendo per ogni coppia i parametri necessari al trattamento e senza procedure automatiche. Essendo questo uno dei primi lavori sull'area, la decisione di procedere “*senza automatizzazioni*” è stata presa essenzialmente per due motivi:

- comprendere quali siano i parametri interferometrici ottimali relativamente alle soglie da scegliere e alla distanza temporale per un'area a forte eterogeneità topografica ed alto tasso di vegetazione;

- non forzare la procedura di batch implementata in SARscape per il calcolo di interferogrammi che non hanno il necessario numero di punti utili ad una minima coregistrazione (la versione 4.1 del software prevede una migliore implementazione di questa funzionalità).

I tragitti orbitali forniti negli “header files” delle immagini non sono sempre molto precisi favorendo la comparsa di frange orbitali. Queste, anche se attraverso opportuni procedimenti possono essere rimosse dall'interferogramma, mascherano le deformazioni. Quindi, sempre al fine di minimizzare gli errori geometrici, sono stati utilizzati i file orbitali forniti dall'Università di Delft (<http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/>) che forniscono dati più precisi relativamente alle orbite realmente seguite dai satelliti fornendo di conseguenza coregistrazioni e risultati migliori. SARscape fornisce un tool apposito (*Update orbital data*) che, successivamente all'operazione di estrazione delle immagini, consente l'aggiornamento dei parametri orbitali. Sia per quello che concerne la generazione degli interferogrammi differenziali che per l'operazione successiva di geocodifica si è utilizzato un Modello Digitale del Terreno messo a disposizione dal Centro Cartografico Regionale (risoluzione di 40 x 40m; ricavato con la fusione di dati derivati dalla digitalizzazione delle curve di livello della Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000 e da quelle relative al volo Italia 94). Una ristretta campagna di misure GPS per le specifiche aree di studio ha ulteriormente convinto nella possibilità di utilizzo del DTM in questione vista l'apprezzabile precisione delle coordinate planimetriche.

Il lavoro ha portato alla realizzazione di più di 100 interferogrammi di cui una parte però non presentava coerenza sufficiente per un'analisi affidabile. Tutti gli interferogrammi sono stati filtrati con l'utilizzo di un filtraggio convenzionale: si è previsto l'utilizzo di una finestra di

calcolo di dimensioni definite dove l'operazione di filtraggio adatta la larghezza di banda alla frequenza locale della frangia. Il filtraggio dell'interferogramma consente una più agevole successiva fase di "unwrapping". A questo punto del processing e prima delle operazioni di "srotolamento della fase" (Figura 74), per gli interferogrammi in cui sono stati osservati fenomeni di noise, è stato previsto l'utilizzo del software SHISSOR (Par. 4.2.3). L'inserimento delle matrici di dati fornite da SARscape all'interno di SHISSOR non risulta semplice ed immediata. SHISSOR è un software sperimentale con ancora numerosi bugs a livello interfaccia.

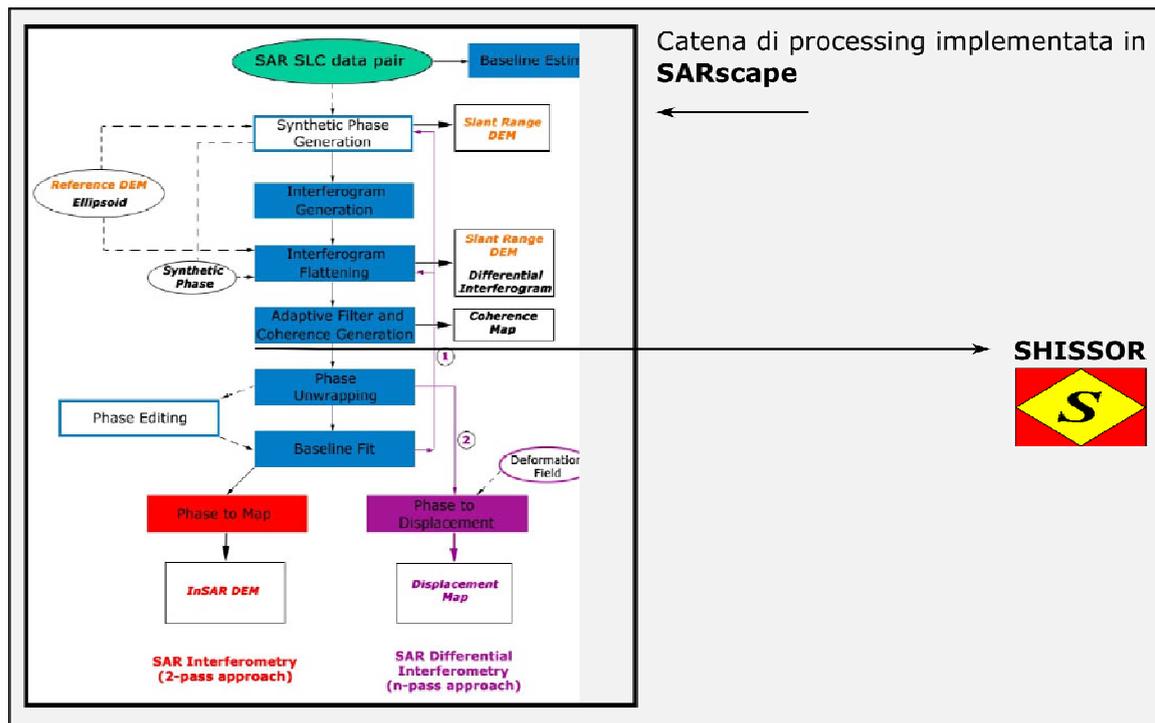


Figura 74. Catena di processing implementata in SARscape.

È messo in evidenza il livello del processing in cui si è previsto l'utilizzo del software SHISSOR per gli interferogrammi che presentavano problemi di noise.

Si è dovuto quindi mettere a punto una procedura che permettesse di trasferire le matrici tra i due software senza perdita o produzione di informazione. Innanzitutto si sono dovuti risolvere problemi di importazione/esportazione dei file generati dai due software cosicché gli stessi potessero accettare i prodotti singolarmente generati. Si è dovuto mettere a punto un metodo affinché potessero essere generati appositi header file utili alle rispettive importazioni. Dopo differenti prove su aree a deformazione nota e di cui si conosceva direttamente l'entità dei fenomeni deformativi (Fortunato et al., 2007; Fortunato et al. 2008) si è riusciti a standardizzare una procedura a cui è seguita la redazione di una miniguia. I parametri caratteristici relativi alle finestre di analisi e alle soglie utilizzate in SHISSOR sono quelli indicati al paragrafo 4.2.3.

5.2 Mappe di Deformazione del Suolo (slant range)

Tenuto conto del numero elevato d'interferogrammi prodotti, non è risultato possibile presentarli tutti in questa tesi. Nella Figura 75 sono indicate, in geometria slant range, le aree oggetto di osservazione specifica i cui interferogrammi relativi sono presentati nelle pagine seguenti.

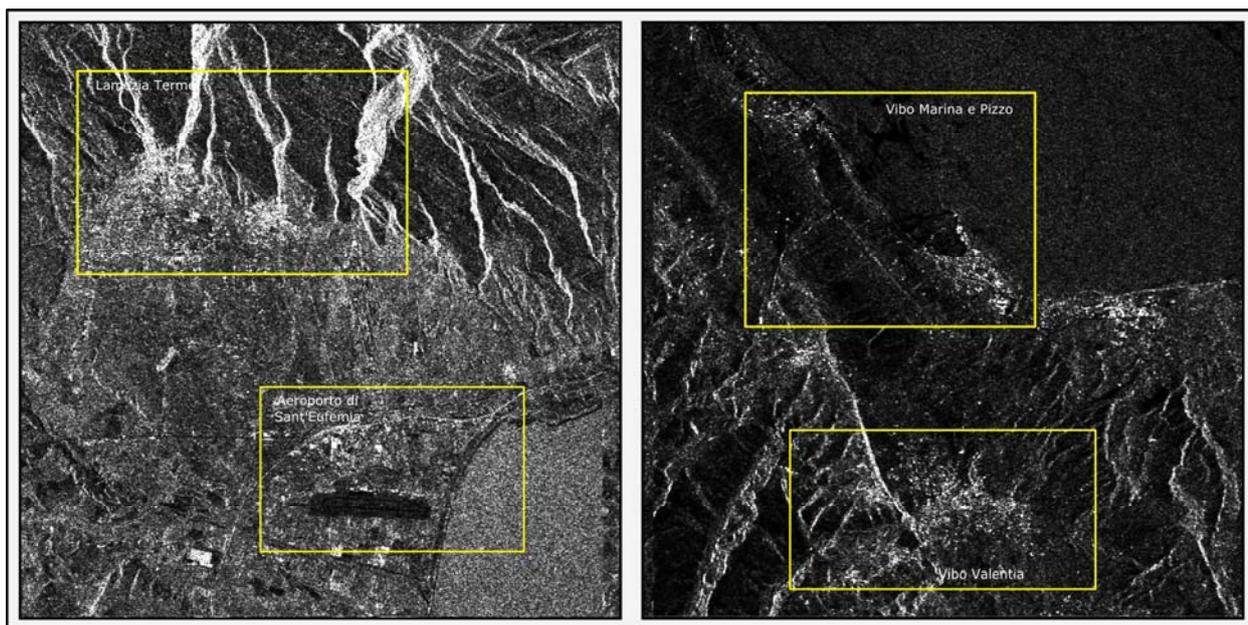


Figura 75. Aree estratte dagli interferogrammi, in geometria slant range, oggetto di analisi dedicate.

A sinistra quelle relative alla città di Lamezia Terme ed all'Aeroporto Sant'Eufemia. A destra la città di Vibo Valentia, di Vibo Marina con il porto e Pizzo.

L'area in questione sono state scelte e risultate quindi oggetto di investigazioni dedicate sia perché durante l'utilizzo preliminare della tecnica DInSAR come "mezzo di prima detezione" si erano avute indicazioni confortanti sulla presenza di segnale di fase sfruttabile sia perché le stesse costituiscono aree di interesse specifico relativamente alla sicurezza della popolazione residente ed al controllo di importanti infrastrutture che su di esse insistono.

Le successive Figura 76 - Figura 94 illustrano alcuni interferogrammi ottenuti per il periodo compreso tra il 1993 e il 2000 e relativi alle aree indicate in Figura 75. Tutte le immagini sono in geometria slant range. In questa fase del lavoro si sono voluti mostrare i risultati dell'elaborazione interferometrica differenziale così come sono disponibili alla fine del processamento e prima delle operazioni di geocodifica.

Settore città di Lamezia Terme

La Figura 76 rappresenta un'immagine d'intensità relativa alla città di Lamezia Terme, in geometria slant range. Si può individuare il centro urbano caratterizzato da pixel molto luminosi derivati dalla grande capacità di retrodiffusione degli edifici. Nella parte superiore è distinguibile la marcata orografia dell'area con superfici molto riflettenti ed altre in ombra per cui non è possibile ricavare informazione.

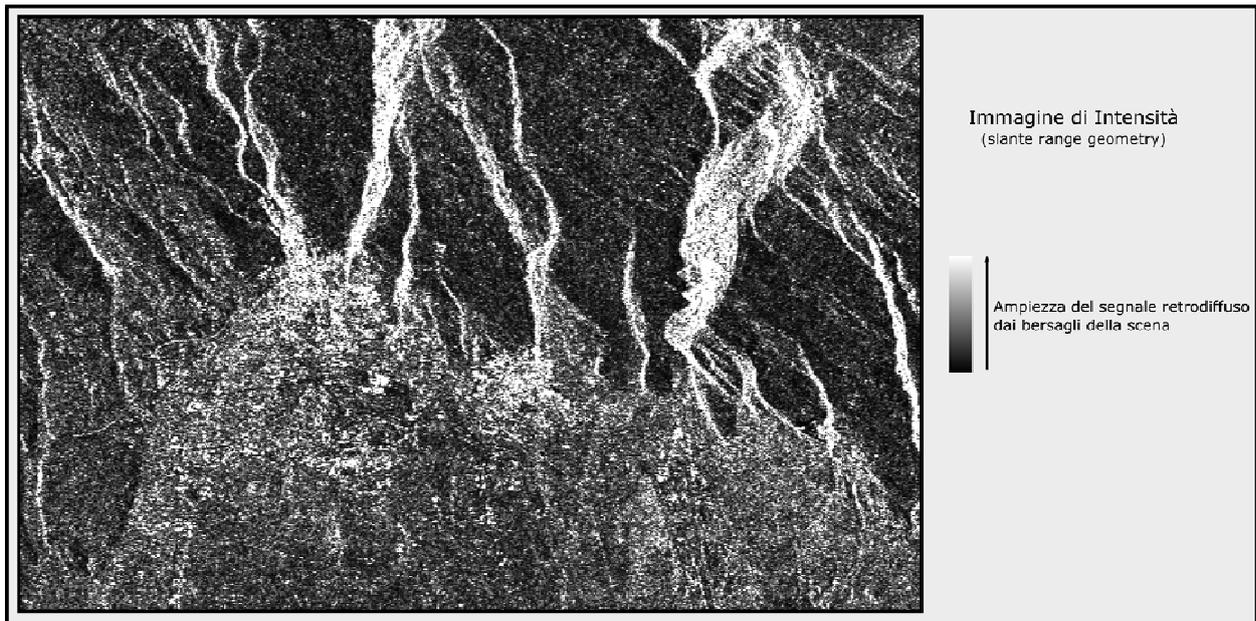


Figura 76. Immagine d'intensità relativa all'area del centro urbano di Lamezia Terme in geometria slant range. Costituisce il riferimento per le indicazioni relative agli interferogrammi successivi.

La Figura 77 presenta un interferogramma filtrato sulla quasi totalità del periodo osservabile per le immagini ERS. Due aree di deformazione possono essere messe in evidenza. Per queste sembrerebbe possibile osservare una frangia interferometrica completa, da cui dedurre conseguentemente circa 3 cm di deformazione lungo la linea di vista del satellite. Sebbene già in questa fase sia possibile derivare informazioni relative ai movimenti del suolo, non sono state avanzate valutazioni specifiche sull'entità delle deformazioni. Infatti, per la loro corretta stima, devono essere fatte ulteriori considerazioni relative all'individuazione di punti a deformazione nota, all'inclinazione del terreno e all'orientazione dei pendii nei punti specifici. In ogni caso l'individuazione delle stesse aree sugli altri interferogrammi presentati successivamente, ha imposto una specifica analisi quantitativa i cui risultati sono presentati nel capitolo 6.

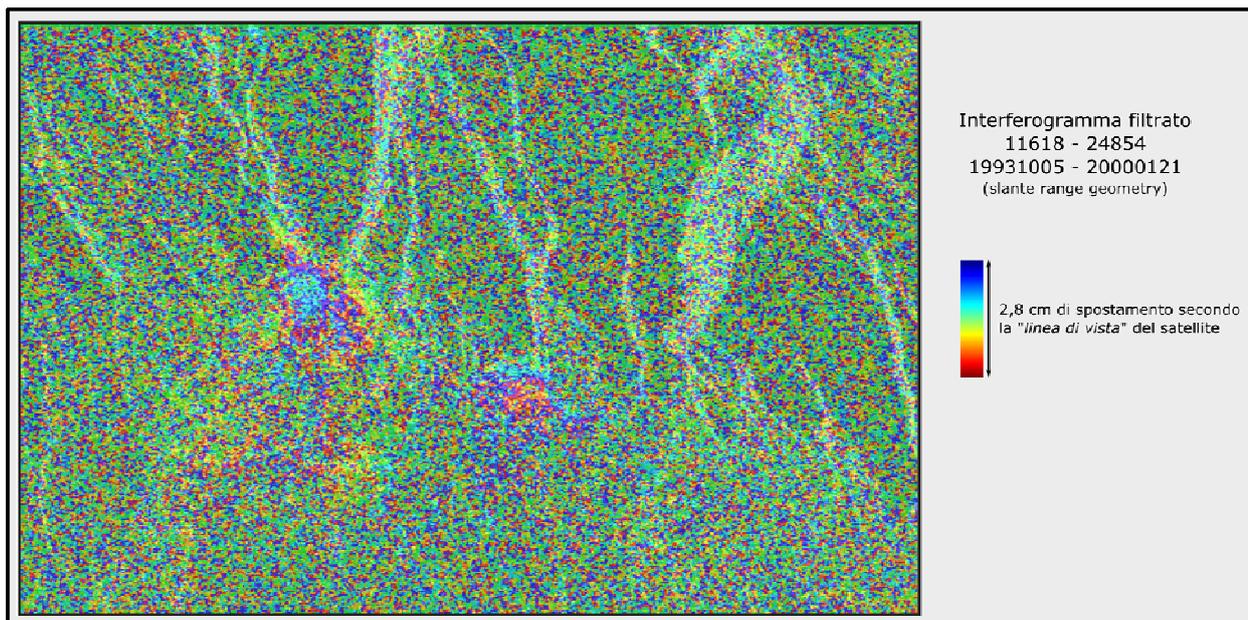


Figura 77. Interferogramma filtrato (19931005 – 20000121) in geometria slant range sull'intero periodo coperto dai dati derivati dal sensore ERS.

Possono essere rilevate chiaramente due aree in cui il segnale di fase interferometrica sembra indicare deformazioni di superficie relativamente alle aree di Nicastro e San Biase che costituiscono il centro urbano di Lamezia Terme.

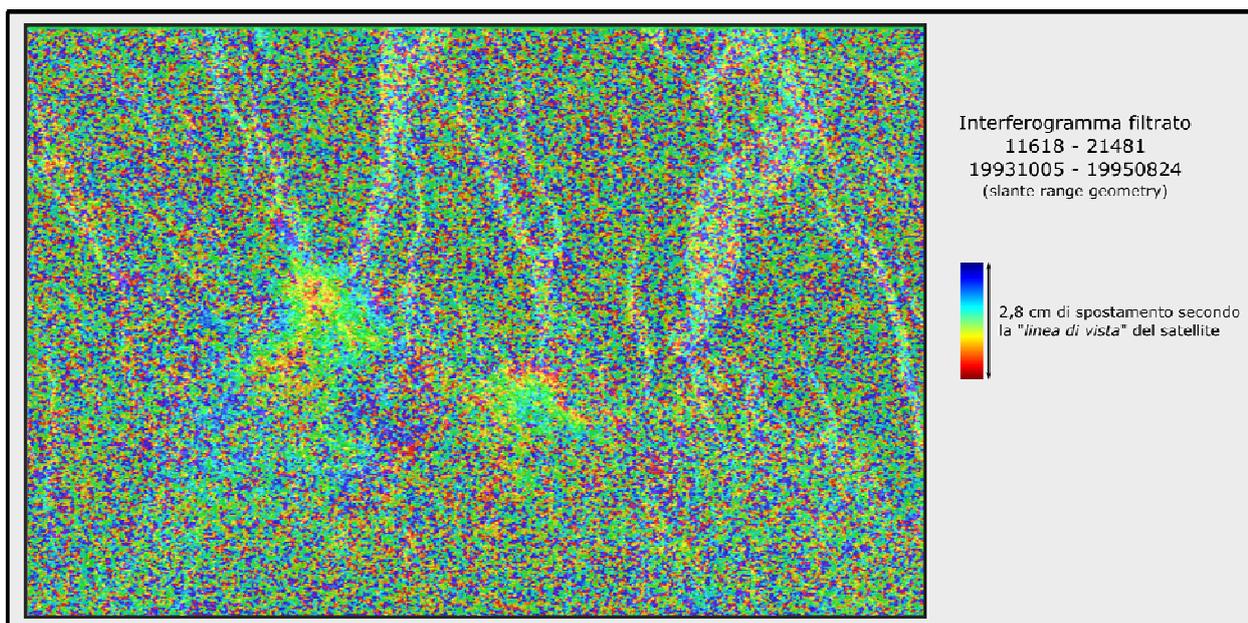


Figura 78. Interferogramma filtrato (ERS / 19931005 – 19950824) in geometria slant range a circa due anni di distanza.

Si possono distinguere due aree principali di deformazione in cui è possibile osservare delle frange interferometriche. La frangia interferometrica a sinistra (Nicastro) risulterebbe a sua volta formata da due aree (picchi di deformazione) distinguibili.

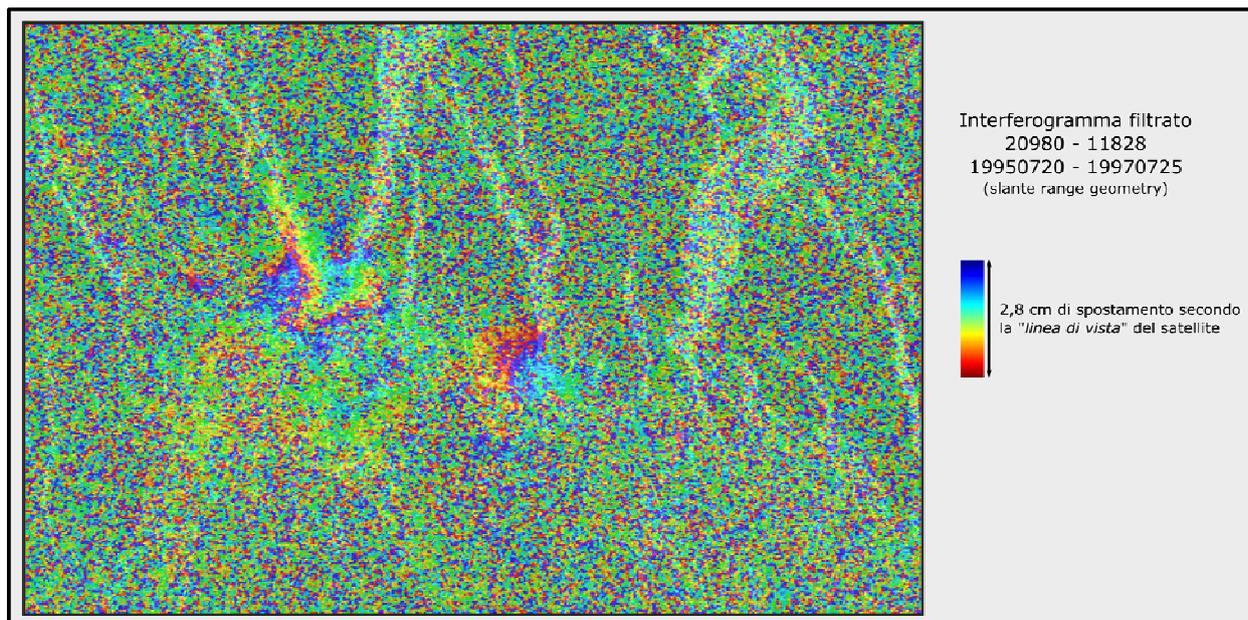


Figura 79. Interferogramma filtrato (ERS / 19950720 – 19970725) in geometria slant range a circa due anni di intervallo.

Possono essere identificate due aree principali in cui il segnale di fase interferometrica da indicazioni su potenziali fenomeni di deformazione. Anche in questo caso, la frangia interferometrica a sinistra (Nicastro) sembrerebbe isolare due aree distinte di movimento.

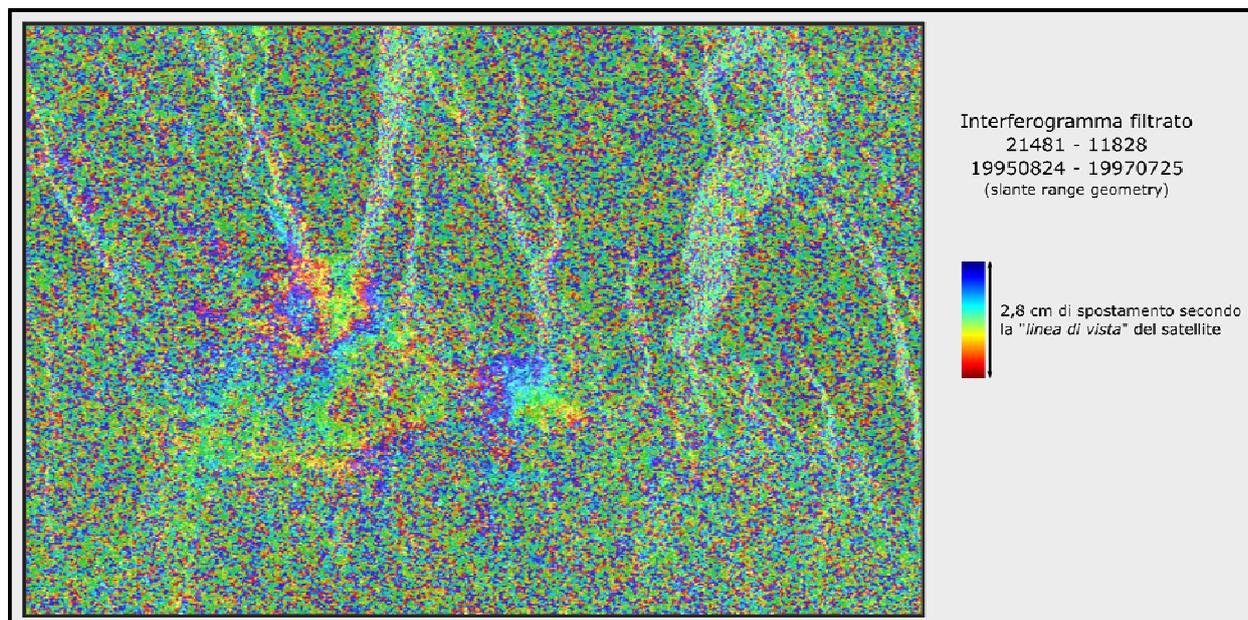


Figura 80. Interferogramma filtrato (ERS / 19950824 – 19970725) in geometria slant range su un periodo di circa due anni.

Possono essere rilevate due aree principali di deformazione. Nella frangia interferometrica di sinistra (Nicastro) sembra confermata l'esistenza di una specifica area a deformazione più spinta.

Settore Aeroporto di Sant'Eufemia

In Figura 81 è rappresentata, in geometria slant range, un'immagine d'intensità relativa alla zona su cui è collocato l'aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme. Possono essere agevolmente identificati le aree occupate dalla pista di volo (in basso) e il tracciato autostradale identificabile come una linea in nero nella parte sinistra e alta della figura. Sono identificabili anche concentrazioni di edifici caratterizzati da pixel molto luminosi. A destra la linea di costa e il tratto di mare prospiciente l'area.

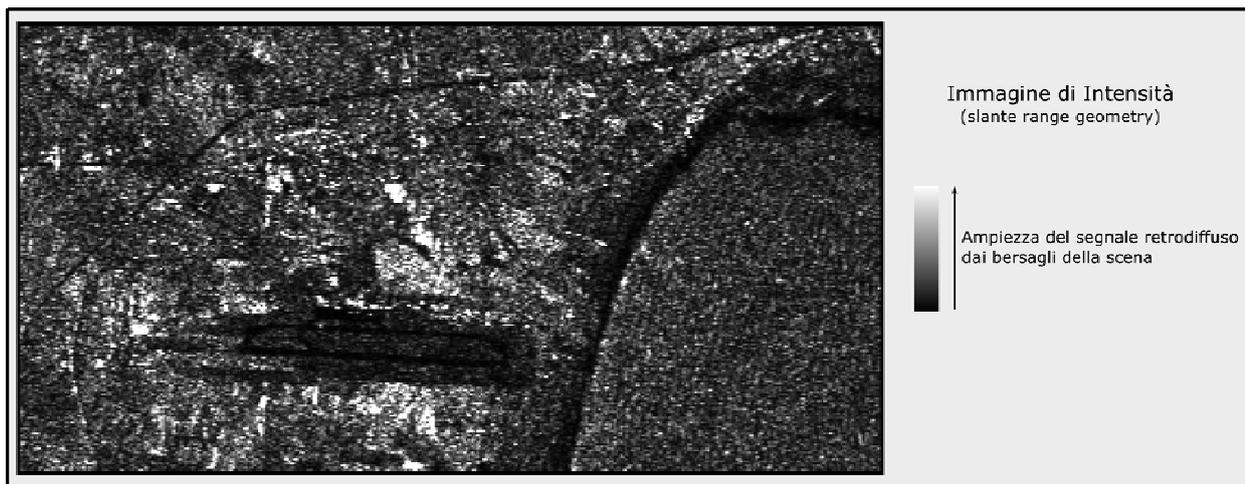


Figura 81. Immagine d'intensità relativa alla città ed all'aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme.

L'immagine, in geometria slant range, può essere utilizzata come riferimento per le indicazioni relative agli interferogrammi successivi.

Per l'area dell'aeroporto di Sant'Eufemia non è stato possibile fare osservazioni con coppie di immagini per tutto il periodo coperto dalle immagini SAR a disposizione. Per un così lungo periodo la decorrelazione temporale risulta molto alta con valori di coerenza non compatibili con una corretta analisi interferometrica. La Figura 82 è relativa ad un interferogramma filtrato su un intervallo di due anni. Per la specifica area di studio, il periodo massimo che permette di preservare valori di coerenza accettabili è di circa 3 anni. Sull'interferogramma possono essere distinte delle variazioni di fase interferometrica che intercettano proprio la struttura costituita dalla pista dell'aeroporto. Informazioni disponibili per l'area ci hanno spinto a concentrare l'attenzione proprio su questa zona. Effettivamente osservazioni simili possono essere effettuate su numerosi altri interferogrammi di cui, di seguito, se ne riportano alcuni esempi. Si precisa che non è possibile fare le osservazioni tipiche derivate dall'analisi DInSAR su aree in deformazione (caratteristiche zone concentriche in scala di colore) ma le osservazioni ripetute fanno supporre l'esistenza di movimenti paralleli alla linea di costa in atto nell'area. Anche in questo caso

l'analisi quantitativa dei risultati sarà presentata nel capitolo 6 dove i dati interferometrici sono stati incrociati con altri derivati dall'osservazione diretta e dalla bibliografia.

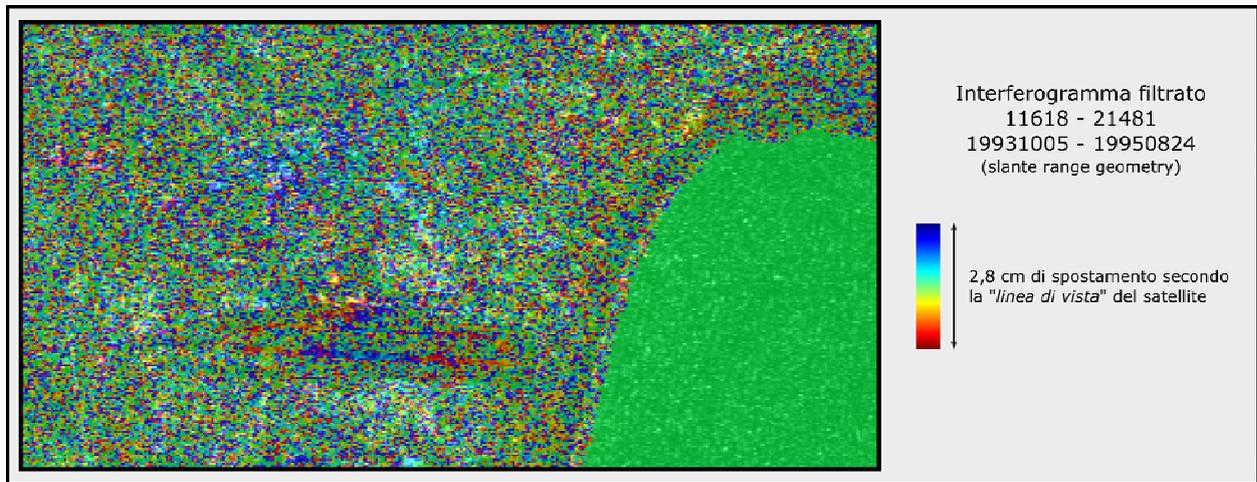


Figura 82. Interferogramma filtrato (19931005 – 19950824) in geometria slant range a circa due anni di intervallo.

Può essere distinta l'area relativa all'aeroporto di Sant'Eufemia in cui il segnale di fase presenta variazioni ascrivibili a movimenti trasversali alla struttura e sub-paralleli alla linea di costa.

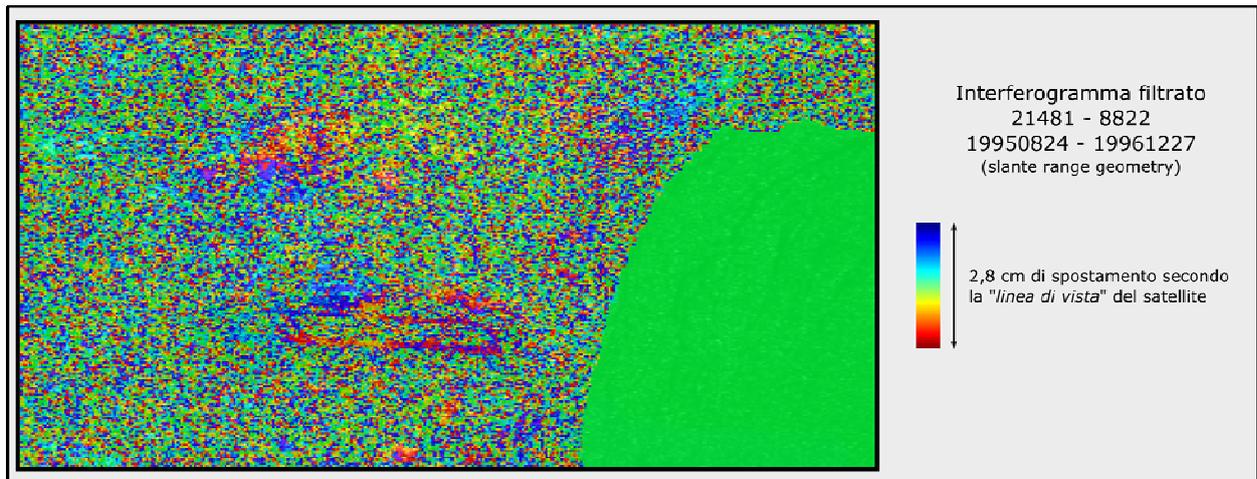


Figura 83. Interferogramma filtrato (19950824 – 19961227) in geometria slant range a circa un anno e mezzo di intervallo.

Può essere principalmente distinta la stessa area individuata in Figura 82 e relativa all'aeroporto di Sant'Eufemia in cui il segnale di fase presenta variazioni ascrivibili a movimenti trasversali alla struttura e sub-paralleli alla linea di costa. Informazioni interessanti sembrano deducibili anche nell'area urbana di Sant'Eufemia poco più in alto della pista dell'aeroporto.

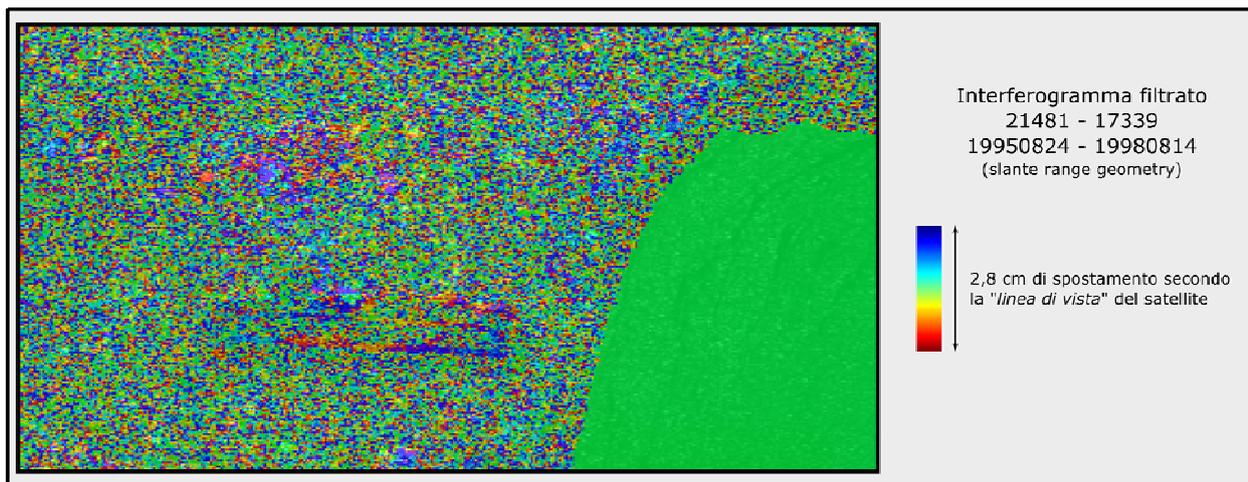


Figura 84. Interferogramma filtrato (19950824 – 19980814) in geometria slant range a tre anni di distanza.
Può essere distinta la stessa area individuata nelle due figure precedenti (Figura 82, Figura 83) e relativa all'aeroporto di Sant'Eufemia in cui il segnale di fase presenta variazioni ascrivibili a movimenti che sembrano attraversare la struttura aeroportuale.

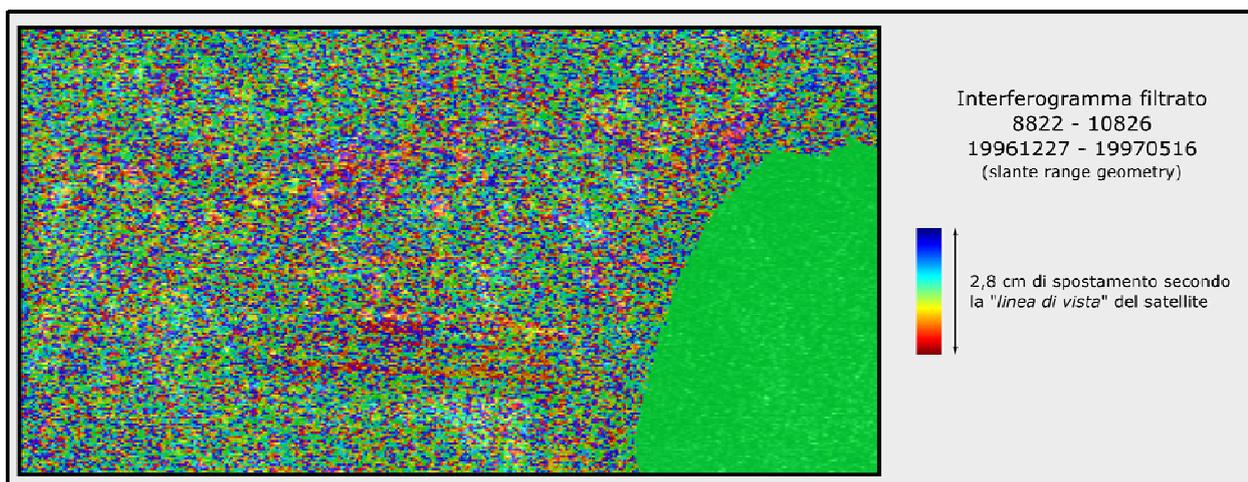


Figura 85. Interferogramma filtrato (19961227 – 19970516) in geometria slant range a cinque mesi di distanza.
Seppur in minor misura, probabilmente per il più corto periodo tra le due osservazioni, anche in questo interferogramma possono essere fatte osservazioni relative a variazioni di fase del segnale interferometrico che riguardano la pista dell'aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme.

Settore Vibo Marina (porto) e Pizzo Calabro

La Figura 86 è un'immagine d'intensità, in geometria slant range, relativa al settore di costa tirrenica su cui si affacciano le città di Vibo Marina e Pizzo Calabro. Per la presenza di pixel ad alta retrodiffusione sono distinguibili due aree relative ai centri urbani indicati. In particolare in alto a sinistra si distingue la cittadina di Pizzo ed in basso a destra quella di Vibo Marina con il porto facilmente distinguibile per la caratteristica forma ad arco. Una buona parte dell'immagine, coprendo il braccio di mare antistante la costa, è rappresentata in nero.

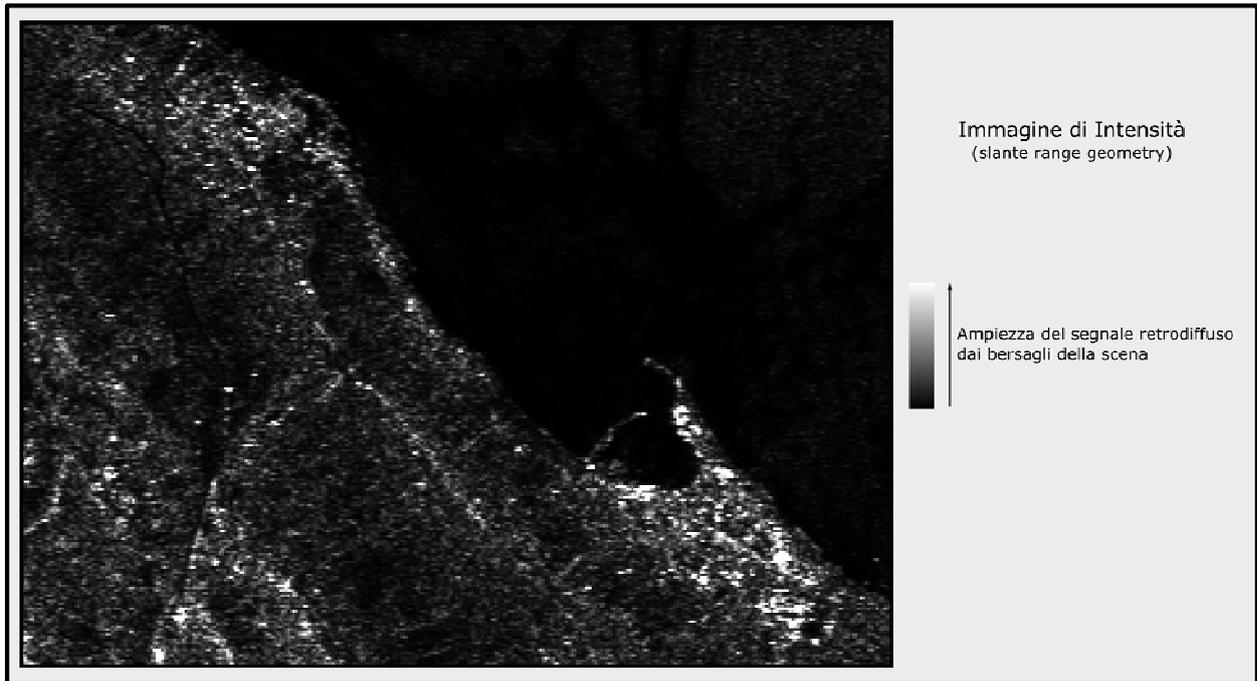


Figura 86. Immagine d'intensità (geometria slant range) relativa ai centri urbani di Vibo Marina e Pizzo.
L'immagine vuole essere di riferimento per le indicazioni relative agli interferogrammi successivi.

Per le aree in oggetto non è stato possibile generare interferogrammi a grande distanza temporale perché l'elevata decorrelazione temporale non permette la generazione di dati affidabili. La Figura 87 è relativa ad un interferogramma filtrato su un intervallo di circa due anni: periodo massimo per la conservazione di valori di coerenza necessari per analisi DInSAR corrette nel caso specifico. Su tutti gli interferogrammi che presentano discreta coerenza è stato possibile individuare una zona di deformazione in una zona prossimale al porto e coincidente con una parte dell'area industriale di Vibo Marina. Inoltre, su alcuni interferogrammi, sono riconoscibili variazioni di fase interferometrica compatibili con movimenti in atto nell'area urbana di Pizzo (in alto a sinistra negli interferogrammi). L'analisi quantitativa dei risultati sarà presentata nel capitolo 6.

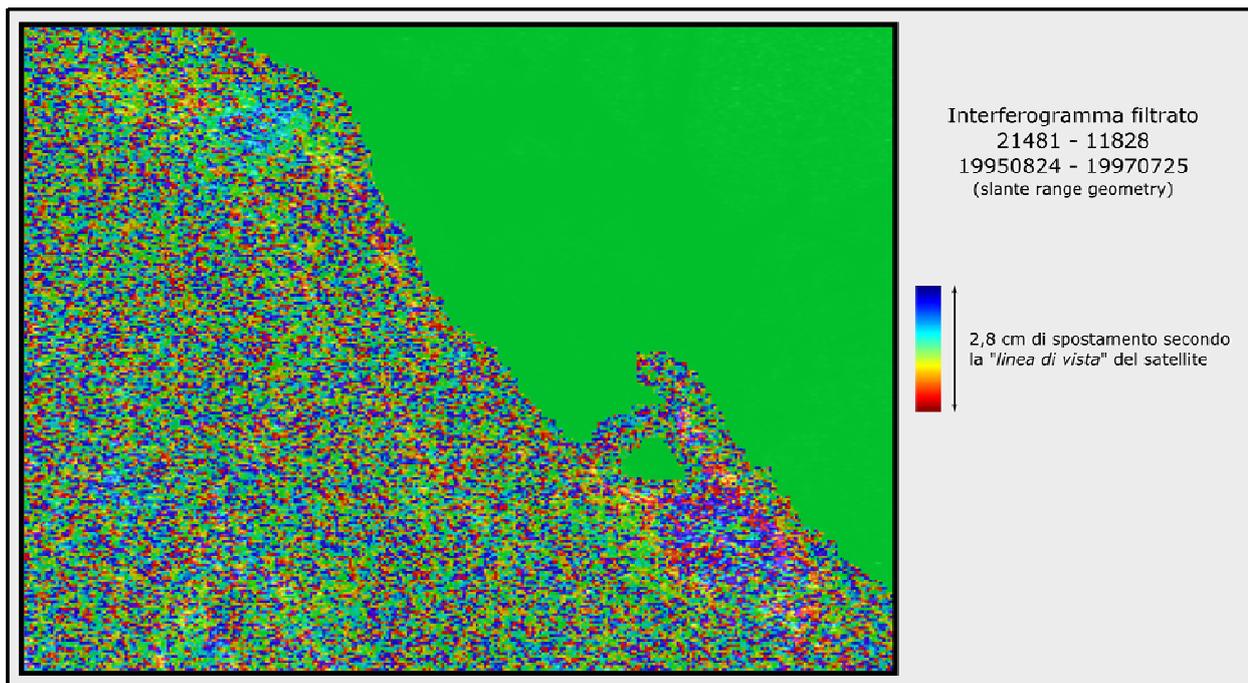


Figura 87. Interferogramma filtrato (19950824 – 19970725) in geometria slant range a circa due anni di distanza.

Possono essere distinte due aree che presentano importanti variazioni di fase interferometrica compatibili con deformazioni del suolo. In alto a sinistra quella relativa all'area urbana del comune di Pizzo; in basso a destra quella concernente la zona industriale di Vibo Marina.

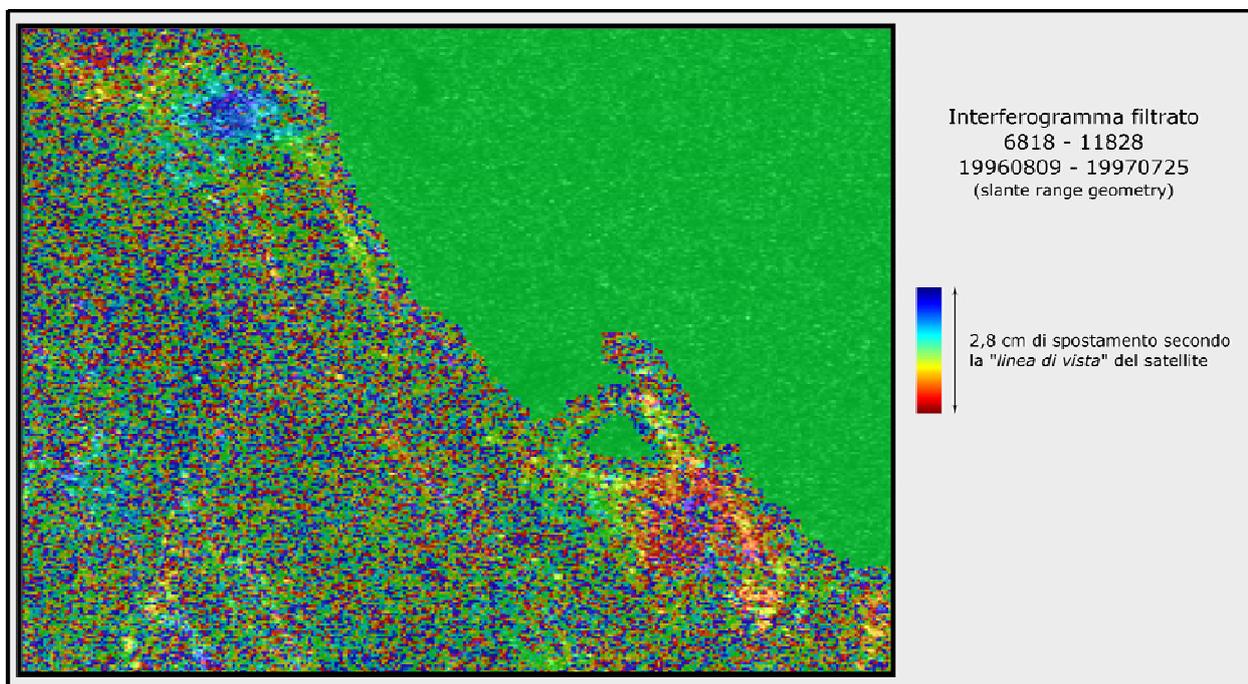


Figura 88. Interferogramma filtrato (19960809 – 19970725) in geometria slant range a circa un anno di distanza.

Anche su questo interferogramma è possibile distinguere le stesse aree in cui si registrano variazioni di fase interferometrica.

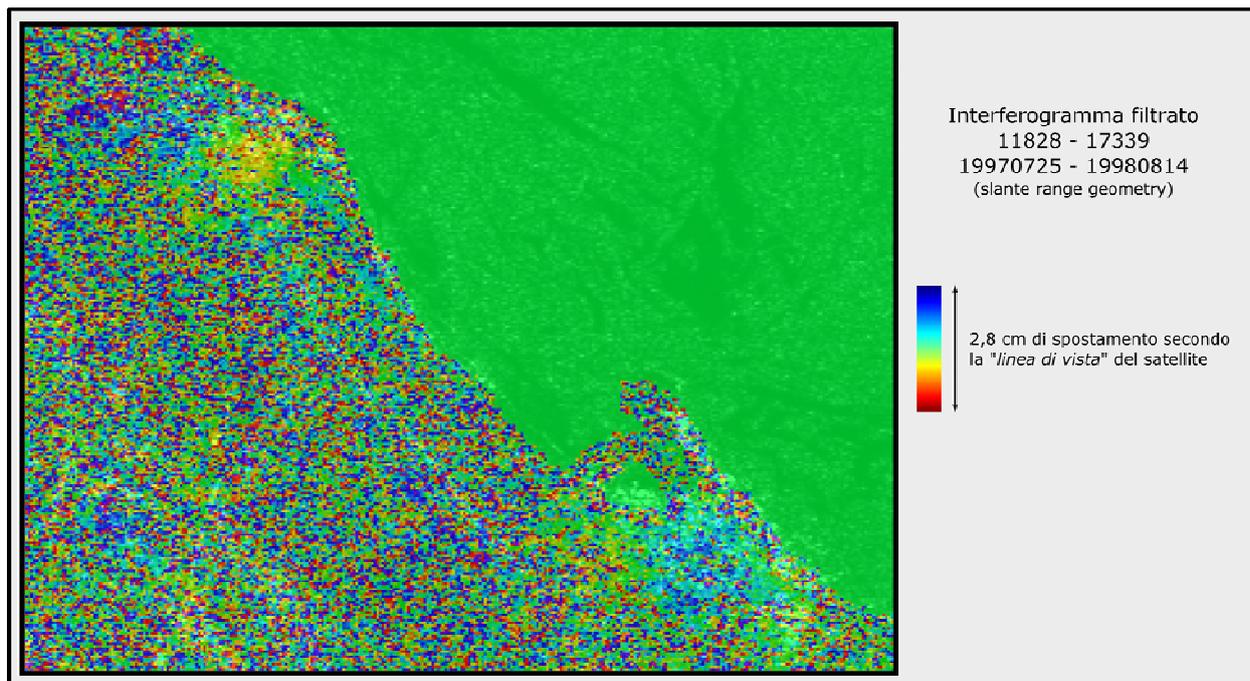


Figura 89. Interferogramma filtrato (19970725-19980814) in geometria slant range a circa un anno di distanza. Anche in questo interferogramma possono essere fatte osservazioni relative alle due aree specificate precedentemente. Le variazioni di fase osservate riguardano sempre le stesse aree a ridosso dell'area industriale di Vibo Marina e nel centro urbano di Pizzo. Le stesse sembrano anche interessare un tratto della Statale 18 anche se in geometria slant range non possono essere derivate informazioni precise sulla geolocalizzazione.

Settore Vibo Valentia

La Figura 90 illustra un'immagine d'intensità, in geometria slant range, relativa alla città di Vibo Valentia. Al centro è identificabile la zona urbana caratterizzata da pixel molto luminosi. È distinguibile anche un tratto della strada che collega la città con l'autostrada A3 SA-RC. Questa, essendo parzialmente realizzata in trincea, risulta molto riflettente con un comportamento tipico di strutture tipo "corner reflector".

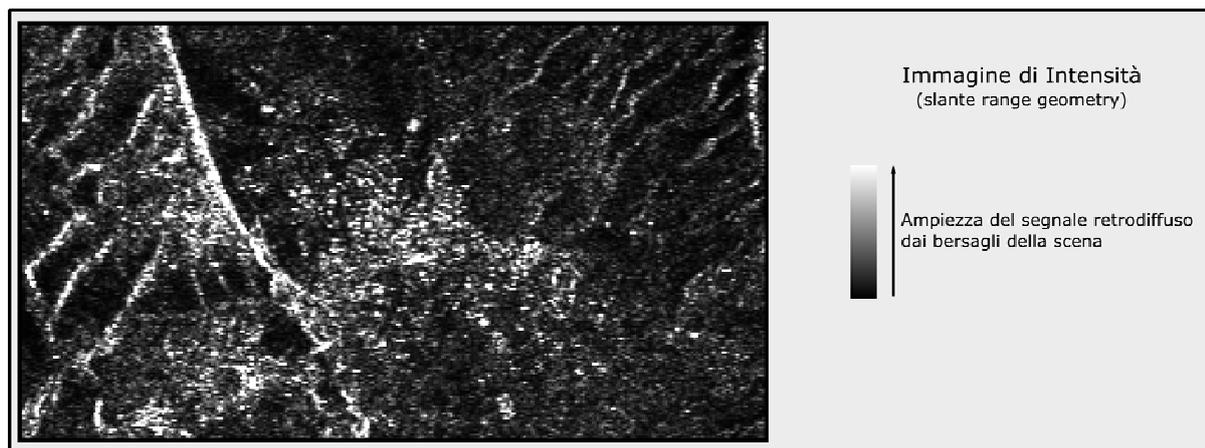


Figura 90. Immagine d'intensità relativa all'area della città di Vibo Valentia.

La zona, in geometria slant range, è di riferimento per le indicazioni relative agli interferogrammi successivi.

Per l'area della città di Vibo Valentia, sebbene non sia stato possibile generare interferogrammi con copertura temporale relativa a tutto il periodo della disponibilità dei dati ERS, si sono potuti generare interferogrammi con acquisizioni fino a 3 anni di intervallo temporale. Infatti, la concentrazione urbana di edifici rende possibile il mantenimento di un valore della coerenza relativamente elevato. In Figura 91 è presentato un interferogramma filtrato su un intervallo di circa tre anni. Sull'interferogramma è stato possibile distinguere una zona caratteristica di deformazione scindibile in due sub-aree specifiche ricorrenti in diversi interferogrammi e riferibile alla zona immediatamente a valle (a Nord) del "quartiere Affaccio" e su aree adiacenti di recente sviluppo urbano. Anche in questo caso le osservazioni non sono quelle tipiche dell'analisi SAR anche perché su quest'area specifica le deformazioni riscontrabili riguardano sempre zone su pendii. I segnali di fase sono stati analizzati quantitativamente nel capitolo 6 dopo considerazioni sull'andamento delle deformazioni attese nell'area.

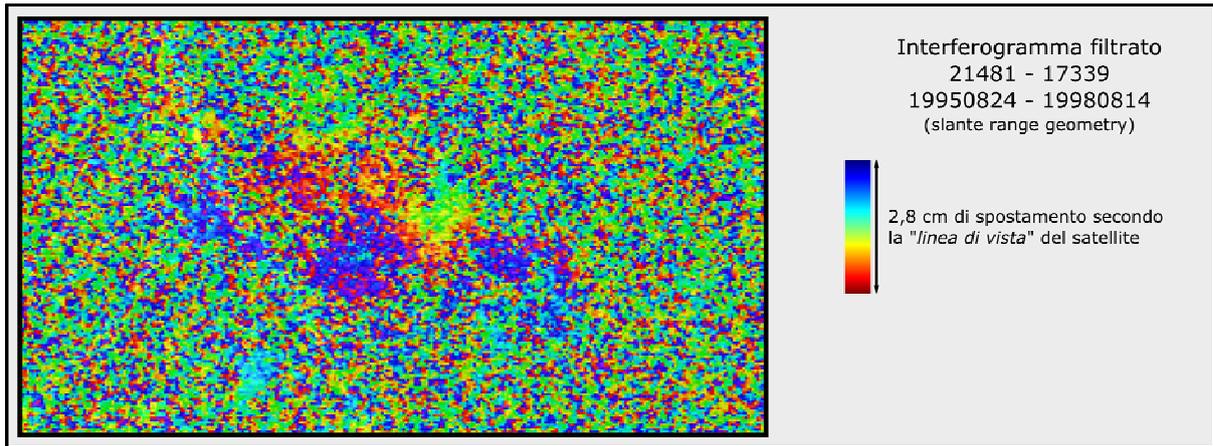


Figura 91. Interferogramma filtrato (19950824 – 19980814) in geometria slant range su periodo di circa 3 anni. È possibile distinguere due aree in cui il segnale di fase interferometrica indica deformazioni di superficie relativamente al centro urbano di Lamezia Terme e specificatamente nell'area del quartiere Affaccio.

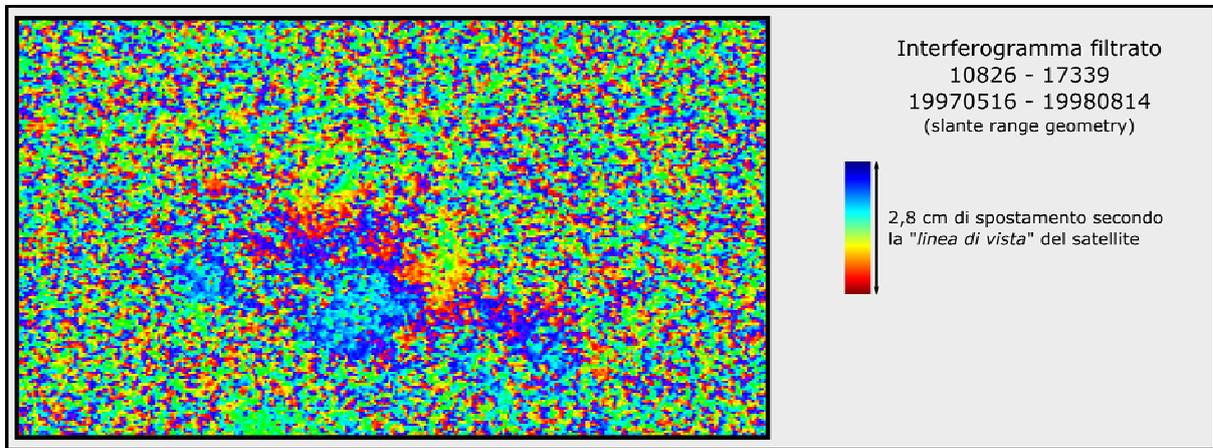


Figura 92. Interferogramma filtrato (19970516 – 19980814), slant range, relativo ad un periodo di circa 1 anno. Anche su questo interferogramma sembra possibile distinguere le stesse aree in cui sono rilevabili variazioni del segnale di fase interferometrica.

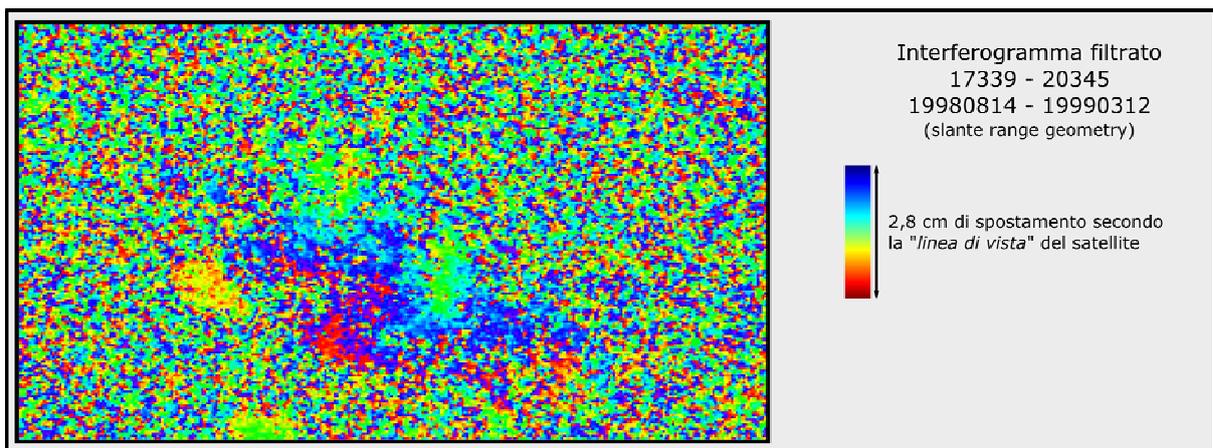


Figura 93. Interferogramma filtrato (19980814 – 19990312), slant range, su un periodo di circa 7 mesi. Seppure in modo non evidente rispetto ai precedenti due interferogrammi è possibile isolare due aree con potenziali fenomeni di deformazione.

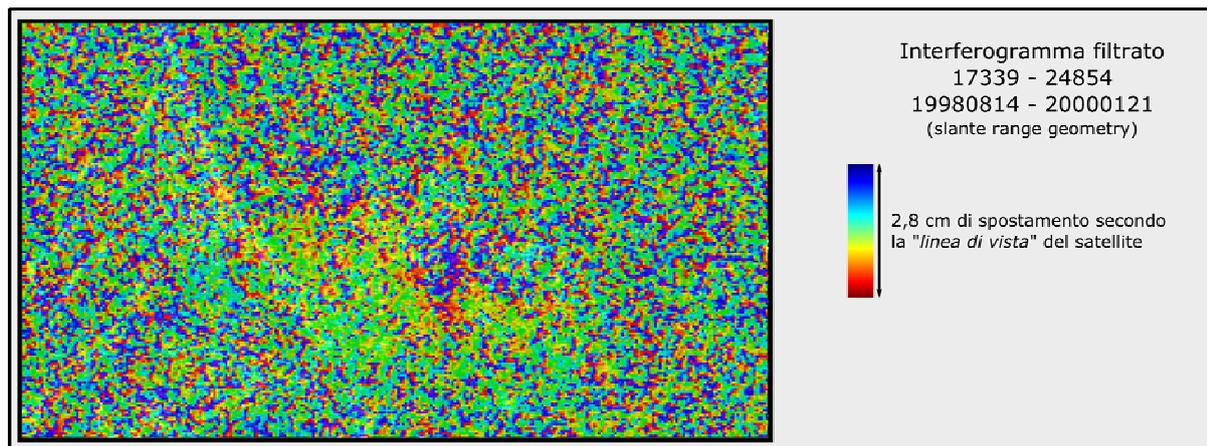


Figura 94. *Interferogramma filtrato (19980814 – 20000121) in geometria slant range su un periodo di circa 1 anno e mezzo.*

È possibile distinguere due aree di deformazione in cui il segnale di fase interferometrica sembra indicare deformazioni di superficie relativamente al centro urbano di Lamezia Terme.

5.3 Prodotti accessori

5.3.1 DSM (Digital Surface Model)

Di seguito si descrivono i risultati derivati dall'utilizzo delle tecniche interferometriche SAR satellitari per la generazione di DSM (Digital Surface Model) ed un loro raffronto rispetto ad un Modello Digitale del Terreno esistente. Sono stati impiegati dati *s/lc* relativi ai satelliti ESA ERS 1/2 nella configurazione Tandem. I dati disponibili hanno permesso di realizzare un DSM di circa 60 Km² centrato sulla zona di studio. Il Modello Digitale del Terreno messo a disposizione dal Centro Cartografico Regionale, con risoluzione orizzontale di 40x40 m², è servito come modello di raffronto per la misura delle differenze nei valori di altezza del terreno ottenuti dopo il processamento interferometrico e la geocodifica dei dati. L'obiettivo è consistito nella valutazione della capacità della tecnica e dell'affidabilità dei dati nella generazione di modelli 3D. Seppur il territorio analizzato presenti delle caratteristiche non ottimali per l'uso della tecnica interferometrica, misurando le differenze di altezza rispetto al DTM esistente, si ottiene (usando tutti i punti del DSM ottenuto) un valore medio di 0,90 m con deviazione standard di 13 m e risultati sensibilmente migliori di quello che è possibile riscontrare oggi in letteratura.

Generalità

La "fase tandem", durante la quale i satelliti ERS1 e ERS2 hanno percorso orbite uguali a distanza temporale di un giorno, ha permesso di avere dati SAR ad alta coerenza. Difatti, la poca distanza temporale assicura una buona correlazione tra le immagini perché in generale sia le condizioni atmosferiche che del terreno hanno una bassa probabilità di variazione. I dati ERS hanno una buona copertura del suolo, per cui è possibile riuscire ad ottenere DSM di ampie zone con relativa buona risoluzione e discrete accuratezze in altezza, in modo rapido ed economico. In alcune fasi del processamento occorrono punti di controllo a terra distribuiti in modo omogeneo sull'immagine. Questi devono essere confrontati con i corrispondenti punti dell'immagine di fase affinché questa possa essere calibrata correttamente. L'operazione può essere eseguita anche con l'ausilio di DTM a bassa risoluzione attraverso operazioni di "baseline fit". Stesso risultato si può ottenere con dati derivati da misure GPS, più precisi rispetto a quelli presi sull'immagine, ma che talvolta risultano operativamente non utilizzabili, ricadendo in punti a bassa coerenza o

dove le frange interferometriche sono molto fitte. La successiva validazione dei DSM ottenuti deve invece essere eseguita con DEM a relativa alta risoluzione. La deviazione standard rispecchierà l'accuratezza dell'immagine interferometrica ottenuta.

La fase interferometrica per la generazione di DSM

Ad ogni pixel di un'immagine SAR è associato un numero complesso risultato della combinazione delle retrodiffusioni di tutti gli oggetti appartenenti ad una cella di risoluzione a terra e della rotazione di fase dovuta al percorso (Ferretti et al., 1998). In particolare la fase di ogni pixel è formata dalla somma di due termini: il primo legato ai retrodiffusori ϕ_r , il secondo dato da:

$$\phi_r = 4\pi r/l$$

dove r è la distanza piattaforma-cella di risoluzione e l è la lunghezza d'onda del radar (pari alla velocità di propagazione divisa per la frequenza del radar). Se ora si considera la differenza di fase tra due immagini SAR, riprese da angoli di vista leggermente differenti, il termine di fase dovuto ai retrodiffusori (almeno in prima approssimazione se la differenza d'angolo è molto piccolo) si cancella e il termine di fase residuo è dato da:

$$\phi = 4\pi \Delta r/\lambda$$

dove Δr è la differenza dei percorsi tra i sensori e la stessa cella di risoluzione a terra. La fase ϕ contiene ancora un numero molto elevato di angoli giro (nota quindi a meno di un elevato multiplo intero di 2π). Tuttavia passando da una cella di risoluzione ad una contigua (pochi metri di distanza) la variazione di ϕ è generalmente sufficientemente piccola da non presentare ambiguità di 2π . La fase ϕ viene detta fase interferometrica e ad essa è legata l'informazione di variazione di Δr (misurata in frazioni di lunghezza d'onda λ) tra pixel dell'immagine SAR, (Ferretti et al., 1998). Nota la posizione dei due satelliti, la misura può essere utilizzata per ricavare l'elevazione relativa tra i pixel dell'immagine e, quindi, generare una mappa numerica di elevazione (Digital Surface Model).

La distinzione tra DEM (DTM) e DSM assume una notevole importanza, da quando è possibile, con particolari tecniche di elaborazione di immagini satellitari (ottiche e radar), ricavare modelli digitali della superficie terrestre. Queste tecniche risultano attualmente indispensabili per generare dati che altrimenti avrebbero bisogno di rilievi costosi e, a volte, impossibili da

realizzare, (es: su zone equatoriali a perenne copertura nuvolosa). Tuttavia, bisogna considerare che i modelli restituiti sono **DSM** e **non DTM**, (Figura 95, Figura 96).

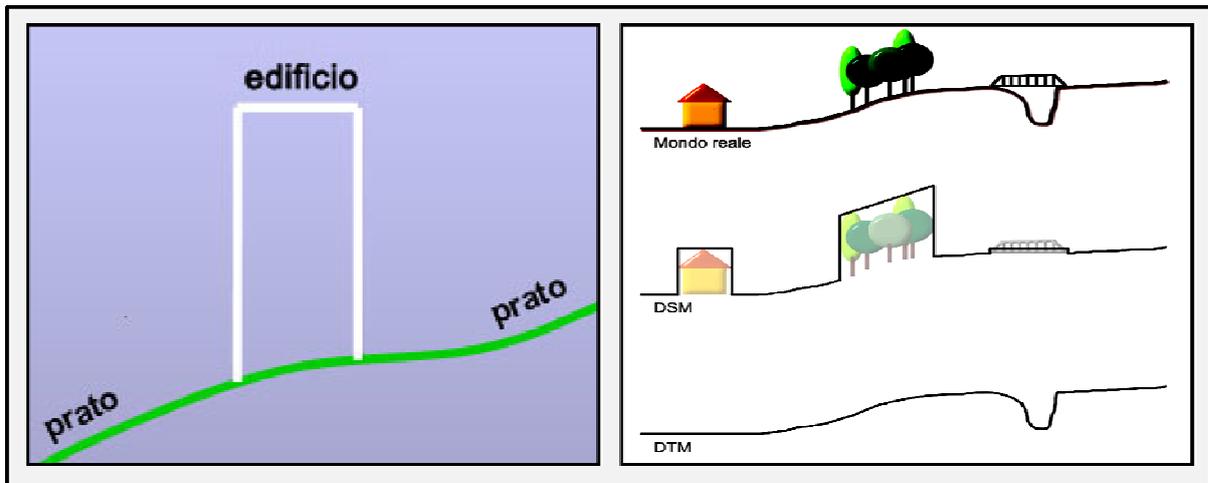


Figura 95. DSM VS DTM.

Un DTM rappresenta l'andamento della superficie terrestre alla quota di campagna. Il DSM invece rappresenta la superficie terrestre costituita anche da tutti gli elementi presenti al suolo: alberi, edifici, ecc.

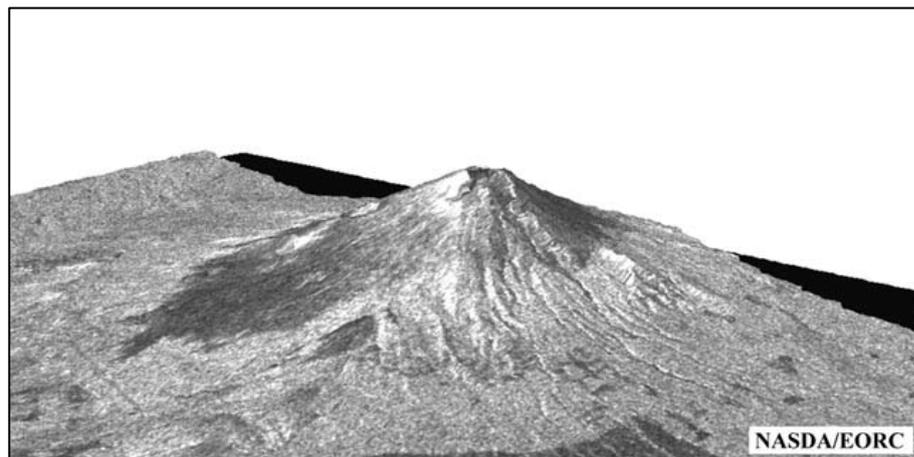


Figura 96. DSM da interferometria SAR – M. Fuji, Giappone.

Nel presente studio, per la generazione di questo tipo di prodotti si è utilizzato il software SARscape® in ambiente ENVI. Nel caso specifico si è utilizzato il modulo per la generazione di DSM cercando di valutare, oltre alle caratteristiche di “qualità” dei prodotti originati, anche la velocità di realizzazione per determinare l’effettiva produttività dell’applicazione per esempio in casi di “emergenza idrogeologica”. Si è proceduto secondo gli step già descritti al par. 4.2.

Dati analizzati

In questa fase si sono avute a disposizione 3 coppie tandem le cui caratteristiche sono riportate nella tabella seguente:

DATA	ORBITE_SATELLITI	BASELINE _L	ALTEZZA di AMBIGUITÀ
a) 19951102 – 19951103	22483 – 2810	246 m	39 m
b) 19991007 – 19991008	43024 – 23351	259 m	34 m
c) 19991216 – 19991217	44026 – 24353	186 m	47,5 m

Tabella 5.1 - Dati relativi alle acquisizioni SAR utilizzate.

È stato possibile generare 3 DSM e diversi prodotti intermedi. Nella Figura 97 sono mostrati i prodotti derivati dal processing del tandem b) per un'area centrata su quella di studio.

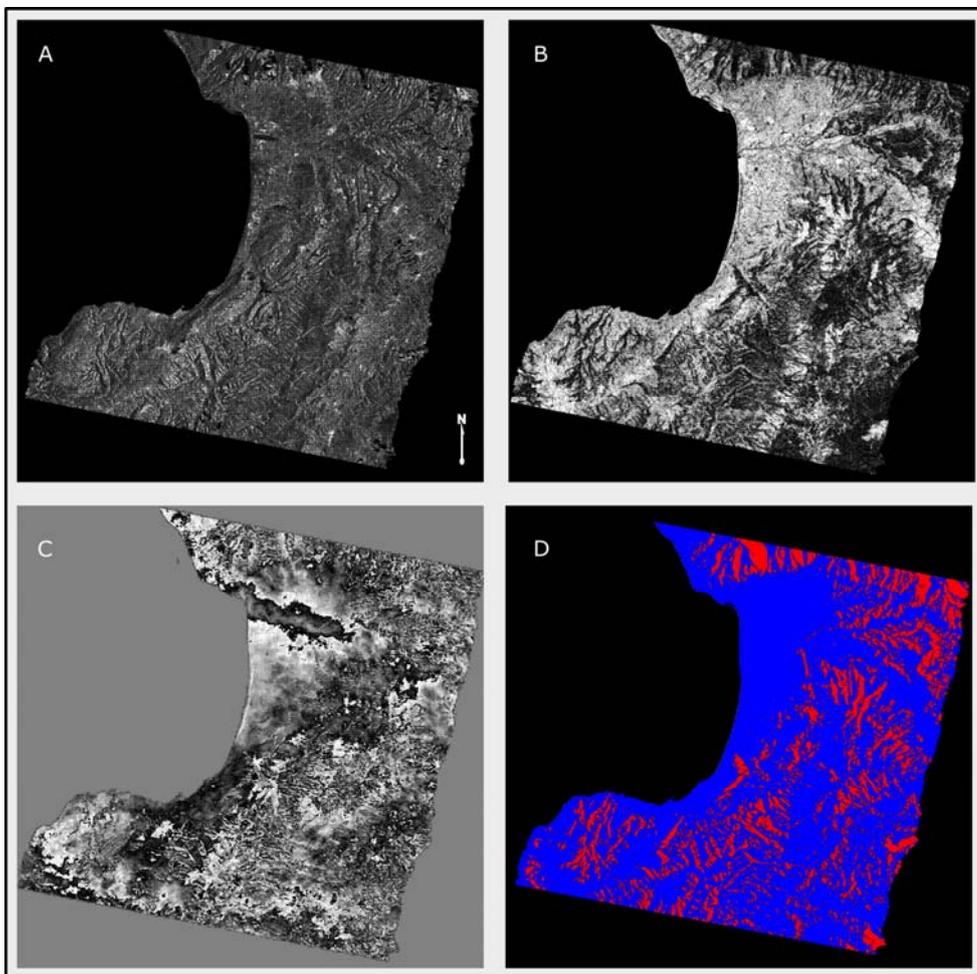


Figura 97. Prodotti derivati dal processing di una “coppia SAR tandem”.

A, B, C rappresentano rispettivamente l'immagine di intensità, di coerenza e l'interferogramma per la sola modalità discendente e relativa al tandem 19991007_19991008. In D, le aree in blu sono le zone direttamente coperte dal satellite; in rosso quelle che il satellite non rileva e che risultano interpolate durante il processing.

Nella Figura 98 un DSM centrato sull'area di studio con estensione di circa 60 Km² e generato a partire dalla coppia tandem 07-08/10/1999. Le altezze sono rappresentate in scala di colore.

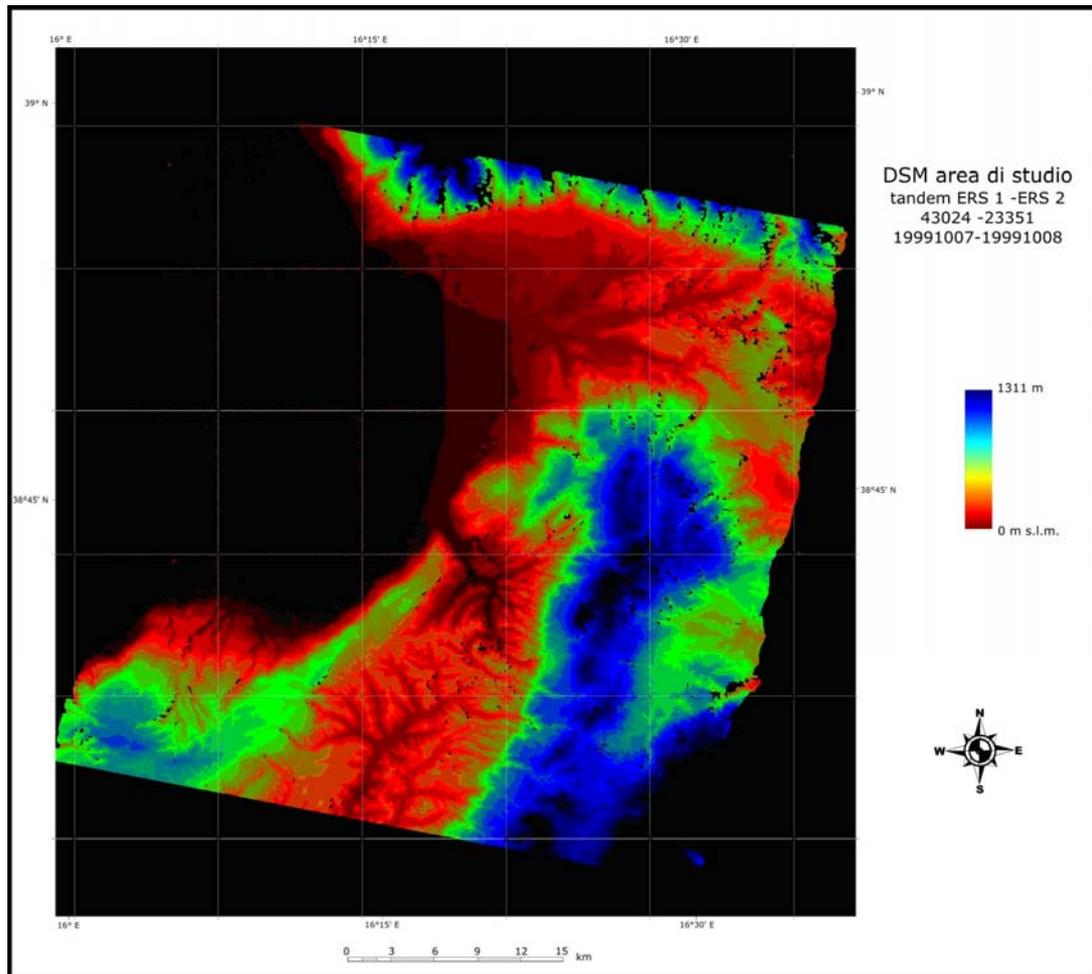


Figura 98. DSM ottenuto dalla coppia Tandem B.

Le variazioni di quota sono rappresentate in scala di colore (risoluzione pixel 25m – WGS-84). I diversi punti neri osservabili corrispondono alle zone in cui il software non ha chiuso l'interpolazione.

Un singolo DSM, a causa delle deformazioni geometriche tipiche delle immagini SAR, nelle zone di foreshortening e di layover risulta interpolato e di scarsa affidabilità. Per ovviare a questi tipi di inconvenienti è necessario combinare diverse coppie tandem acquisite sia durante passaggi ascendenti che discendenti. In questo modo le osservazioni risultano complementari, le deformazioni geometriche fortemente ridotte e le zone montuose possono essere rappresentate con buon dettaglio. L'uso di più immagini interferometriche eviterebbe anche l'effetto dovuto al cambiamento del contenuto di vapor d'acqua nella troposfera che può caratterizzare negativamente il processo di generazione di DSM da immagini non simultanee tipiche del nostro caso.

Raffronto DSM interferometrico VS DTM Centro Cartografico Regionale.

Dai dati disponibili sono stati generati 3 DSM come quello di Figura 98. Le successive operazioni di fusione e media dei Modelli di Superficie generati ha permesso la realizzazione di un unico DSM finale che è stato oggetto di confronto con i dati sull'elevazione del terreno disponibili. L'analisi specifica è stata realizzata su aree ristrette all'interno del DSM generato che risultavano più utili ad integrare i dati investigati nello studio. In particolare si sono estratte due zone centrate sulla città di Lamezia Terme e di Vibo Valentia. La Figura 99 rappresenta la mappa delle differenze di altezza, per l'hinterland lametino, tra il DTM esistente fornito dal Centro Cartografico Regionale (DTM C.C.R) e il DSM interferometrico.

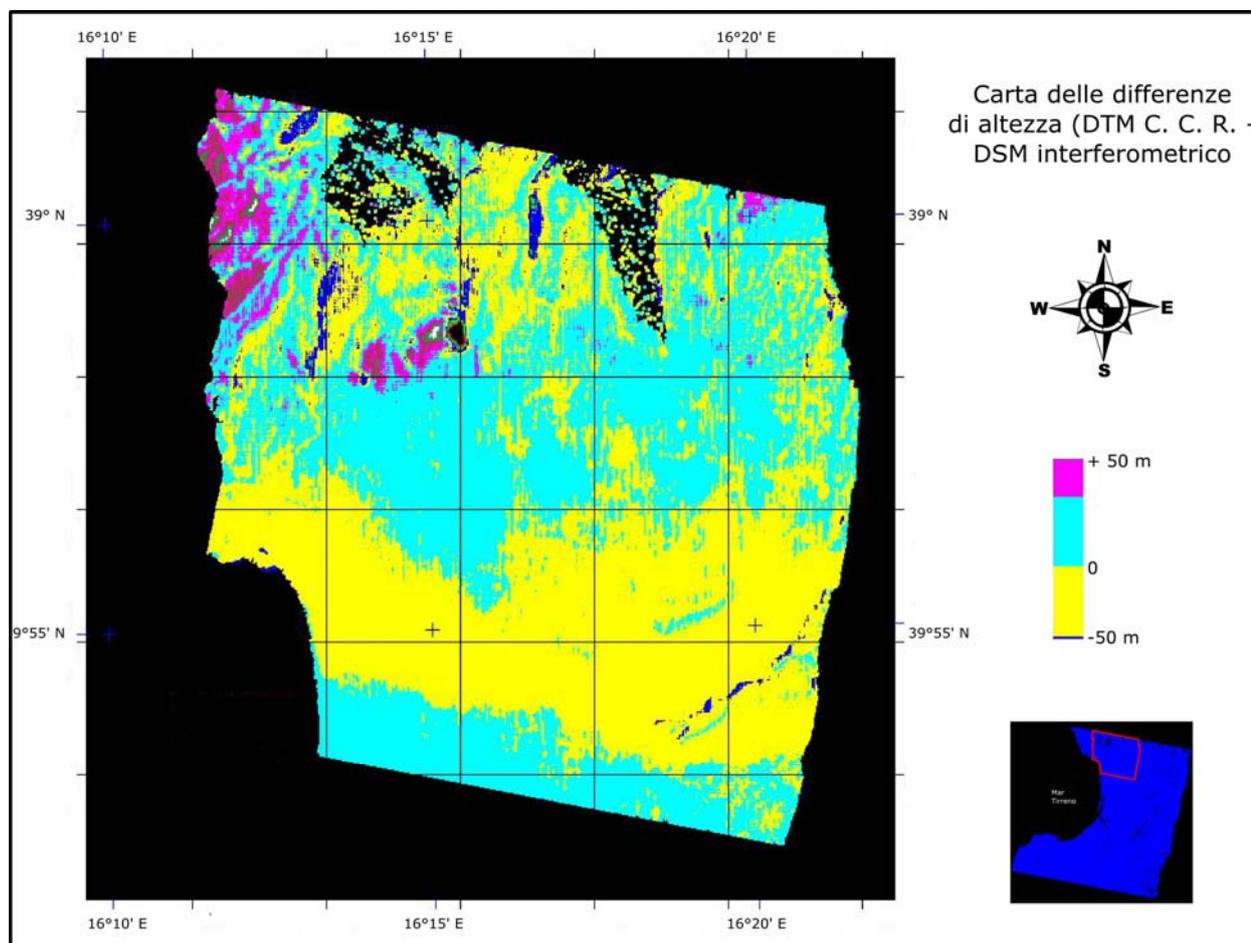


Figura 99. Mappa delle differenze di elevazione (DTM C.C.R. VS DSM InSAR).

Si può constatare che un'alta percentuale dei punti dell'immagine sia rappresentata in ciano e in giallo. Una gran parte della superficie analizzata presenta valori che ruotano intorno allo zero. Altri punti si discostano molto essendo collocati in aree a forte interpolazione e dove il satellite non ha copertura o non può fornire risultati affidabili a causa delle tipiche distorsioni geometriche che affliggono le osservazioni SAR.

L'analisi statistica è stata condotta sia considerando tutti i punti del DSM InSAR (> 300.000) sia solo i punti validi e cioè punti caratterizzati da valori di coerenza relativamente alti (> 45), (tabella 5.2).

Punti modello 3D utilizzati	Δh in metri	Std in metri
tutti	0,90	13,4
solo i validi	0,73	10,8

Tabella 5.2. Dati statistici derivati dalla differenza tra il DSM DInSAR e quello di riferimento.

In Figura 100 è mostrato l'istogramma delle differenze di altezza, considerando la totalità dell'area, tra il DSM SAR e quello di riferimento.

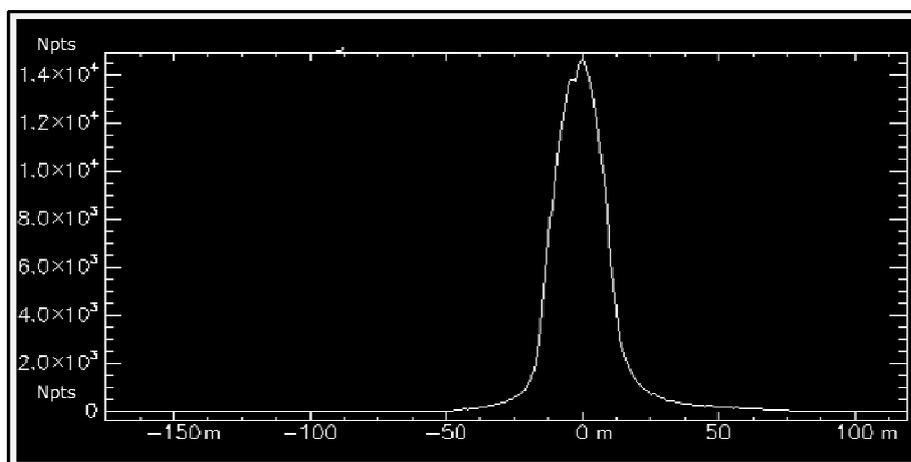


Figura 100. Iistogramma delle differenze di altezza tra il DSM InSAR e quello di riferimento (DTM C.C.R.)

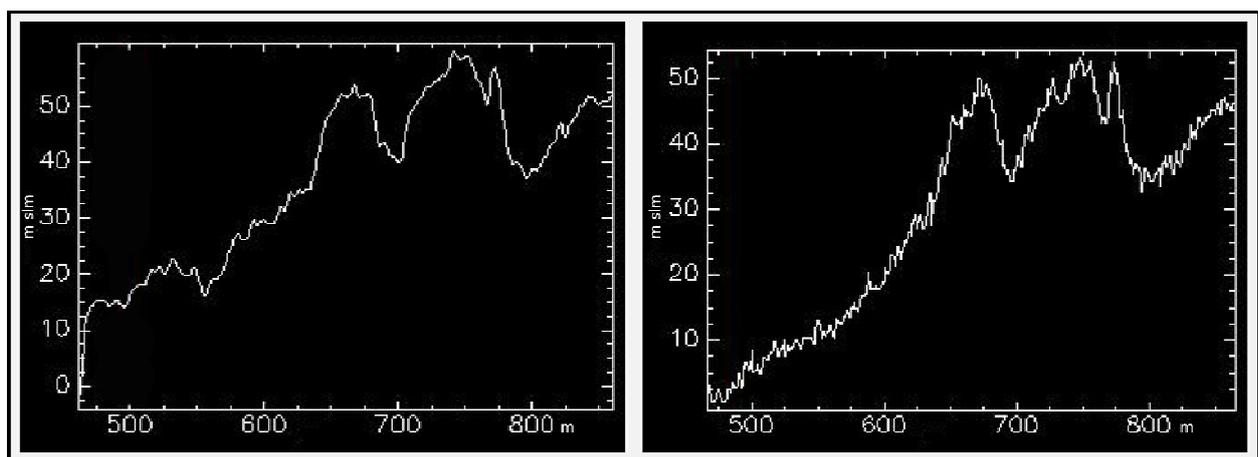


Figura 101. Profili Ovest > Est attraverso un'area della piana di Lamezia (coord. origine 38°54' N, 16 13' E).

A sinistra il profilo ricavato dal DSM interferometrico, a destra quello derivato dal DTM cartografico. Vista l'area essenzialmente pianeggiante la scala dell'elevazione è stata scelta in modo da esaltare le differenze. In ogni caso si può osservare una buona corrispondenza nell'andamento del terreno tra i due modelli tridimensionali.

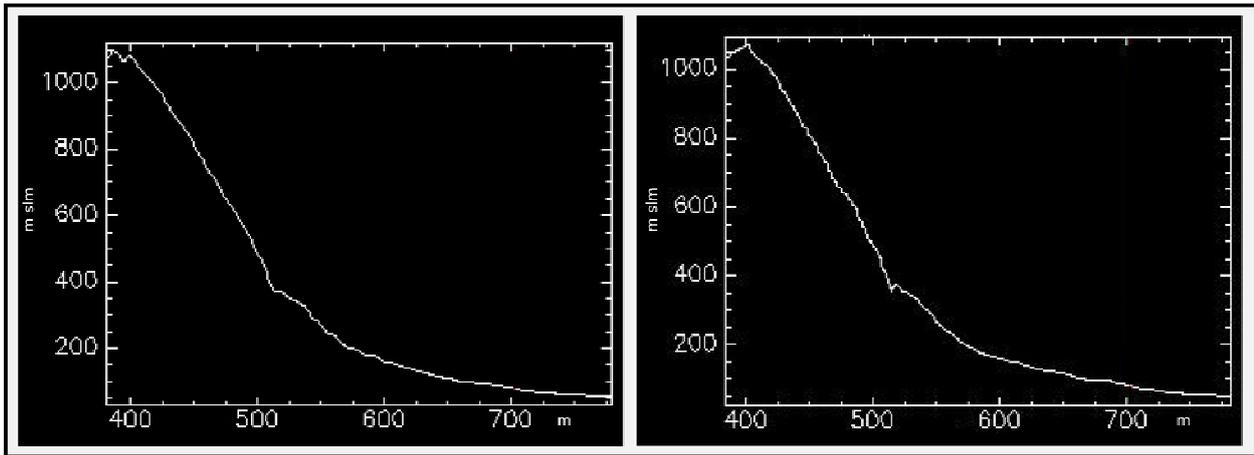


Figura 102. Profili Nord > Sud attraverso un'area della piana di Lamezia (coord. origine 39° N, 16 16' E).

A sinistra il profilo ricavato dal DSM interferometrico, a destra quello derivato dal DTM cartografico. Si nota la buona corrispondenza nell'andamento del terreno tra i due modelli tridimensionali.

I riscontri ottenuti, validano le potenzialità dell'uso dell'interferometria SAR (in particolare la fase Tandem di ERS) per la generazione di DSM. La tecnica impiegata dimostra di essere operativa per la generazione veloce di DSM di buona qualità da cui possono essere ottenute informazioni tipiche derivate dall'analisi dei prodotti di questo tipo. Tuttavia, un primo problema è rappresentato dalla validazione dei dati che va fatta su un numero consistente di *test case* con modelli del terreno ad alta risoluzione da usare come "verità a terra". Inoltre per la corretta valutazione dei risultati è indispensabile combinare acquisizioni satellitari ascendenti e discendenti al fine di consentire una migliore interpolazione durante il processamento.

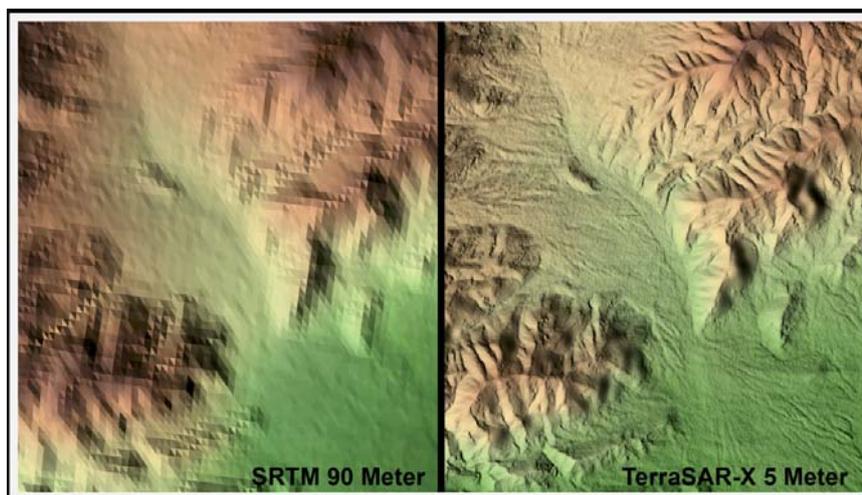


Figura 103. Primo DSM TerraSAR-X (www.dlr.de).

L'immagine mostra un'area vicino la città di Las Vegas. Sulla destra è rappresentato un DSM ad alta risoluzione (5m) realizzato con dati TerraSAR-X (Luglio 2007), confrontato con i dati SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) generati nel 2000 con 90 m di risoluzione.

Questi accorgimenti, insieme all'analisi di dati provenienti dai nuovi sensori a più alta risoluzione, rappresenta una delle prospettive più interessanti della generazione rapida, economica ed affidabile di modelli del terreno. I nuovi sensori SAR, in particolare quelli relativi al satellite TerraSAR-X in configurazione Tandem, hanno consentito, durante i primi test effettuati, di generare Modelli Tridimensionali di Superficie con risoluzione a terra di 5 m (Figura 103).

5.3.2 Cartografia ILU (Interferometric Land Use)

Una parte del lavoro è stata dedicata alla generazione di cartografia tematica di tipo qualitativo, (paragrafo 4.2.4). In sostanza si è voluto valutare se le indicazioni derivate soprattutto dall'analisi della retrodiffusione radar e dal coefficiente di correlazione possono fornire informazioni utili alla classificazione del territorio anche nello studio in questione. Ciò consente all'utilizzatore di dati SAR di avere con un solo tipo di acquisizione sia dati quantitativi (mappe di deformazione e modelli digitali di superficie) che qualitativi (carte di uso del suolo e di classificazione generale del territorio). Quindi, i dati relativi alle immagini di ampiezza e di coerenza sono stati processati per ricavare tematismi di supporto ad ulteriori possibili investigazioni.

Per tutte le successive elaborazioni, derivate utilizzando appositi tool presenti sia in SARscape che in SHISSOR, sono state necessarie delle operazioni preliminari. Innanzitutto le immagini scelte per questo tipo di elaborazioni sono state coregistrate. Questa operazione ha permesso la sovrapposizione spaziale dei pixel corrispondenti con eventuali operazioni di ricampionamento, traslazione e rotazione. Successivamente le immagini coregistrate sono state filtrate per ridurre i fenomeni di speckle (par. 1.5.4) tipiche delle immagini coerenti ottenute dai sensori SAR (o laser). In particolare è stato utilizzato un filtraggio denominato "De Grandi" (De Grandi, 1997) che bilancia la differenza di riflettività tra immagini riprese in tempi diversi. Ultimate queste fasi di preparazione le immagini sono risultate pronte alle successive operazioni di classificazione ed eventuale geocodifica.

Classificazione RGB: una prima classificazione può essere ricavata dalla semplice combinazione RGB di immagini di intensità acquisite in date diverse per analisi di tipo change detection o di classificazione del territorio. In Figura 104 è mostrata una combinazione RGB di 3 immagini acquisite rispettivamente il 20 Luglio, il 24 Agosto e il 28 settembre del 1995, distribuita quindi essenzialmente durante la stagione estiva e più secca dell'anno. In Figura 105 invece una combinazione RGB relativa ad immagini acquisite l'11 Gennaio, il 9 Agosto e il 21 Dicembre del 1996 corrispondente quindi all'intero anno. Se si fa riferimento alla tabella 5.3 in cui, per la figura 104, sono fatti corrispondere i valori della retrodiffusione ai colori specifici, si possono dedurre osservazioni su potenziali cambiamenti delle superfici di retrodiffusione.

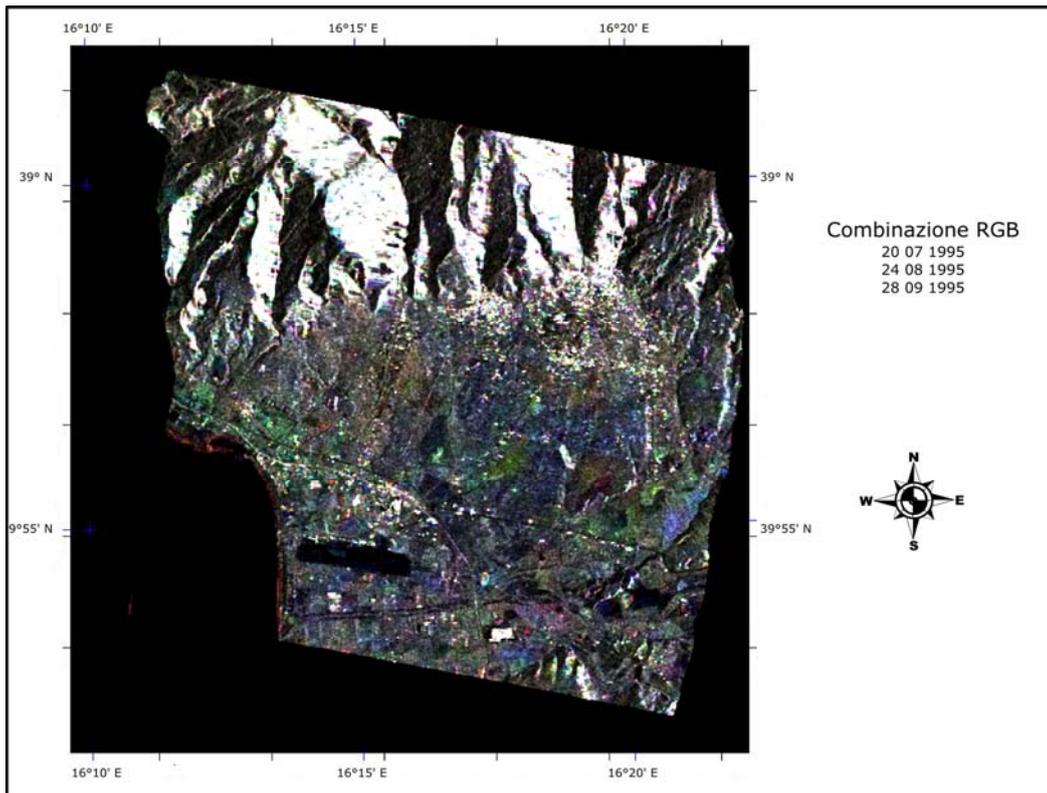


Figura 104. Immagine RGB derivata dalla combinazione multitemporale di 3 immagini SAR di ampiezza.

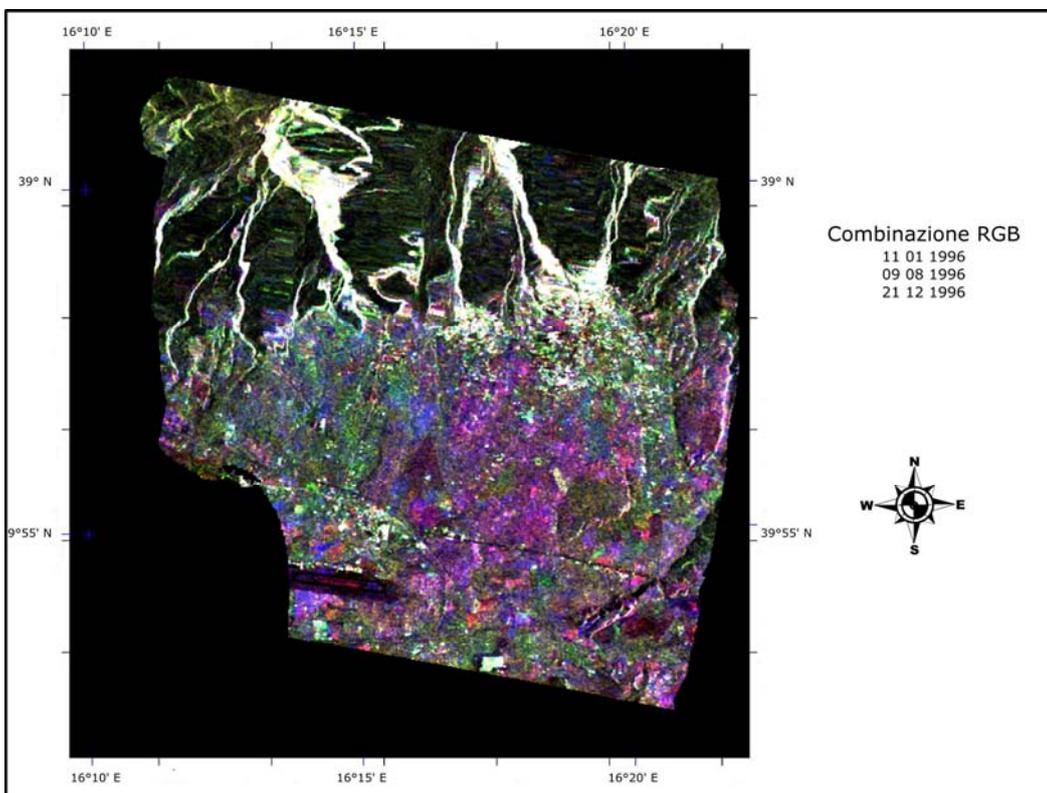


Figura 105. Immagine RGB derivata dalla combinazione multitemporale di 3 immagini SAR di ampiezza.

19950720	19950824	19950928	Color
1	0	0	Red
0	1	0	Green
0	0	1	Blue
1	1	1	White
0	0	0	Black
1	0	1	Pink
1	1	0	Yellow
0	1	1	Turquoise

Tabella 5.3. Tabella colore relativa al valore della retrodiffusione più alto (1) o più basso (0) di 0,5.

Oltre alle informazioni relative ai cambiamenti del valore di retrodiffusione e quindi a variazioni della superficie, si può cercare di associare le superfici con lo stesso comportamento riflettente in classi, utilizzando semplici algoritmi.

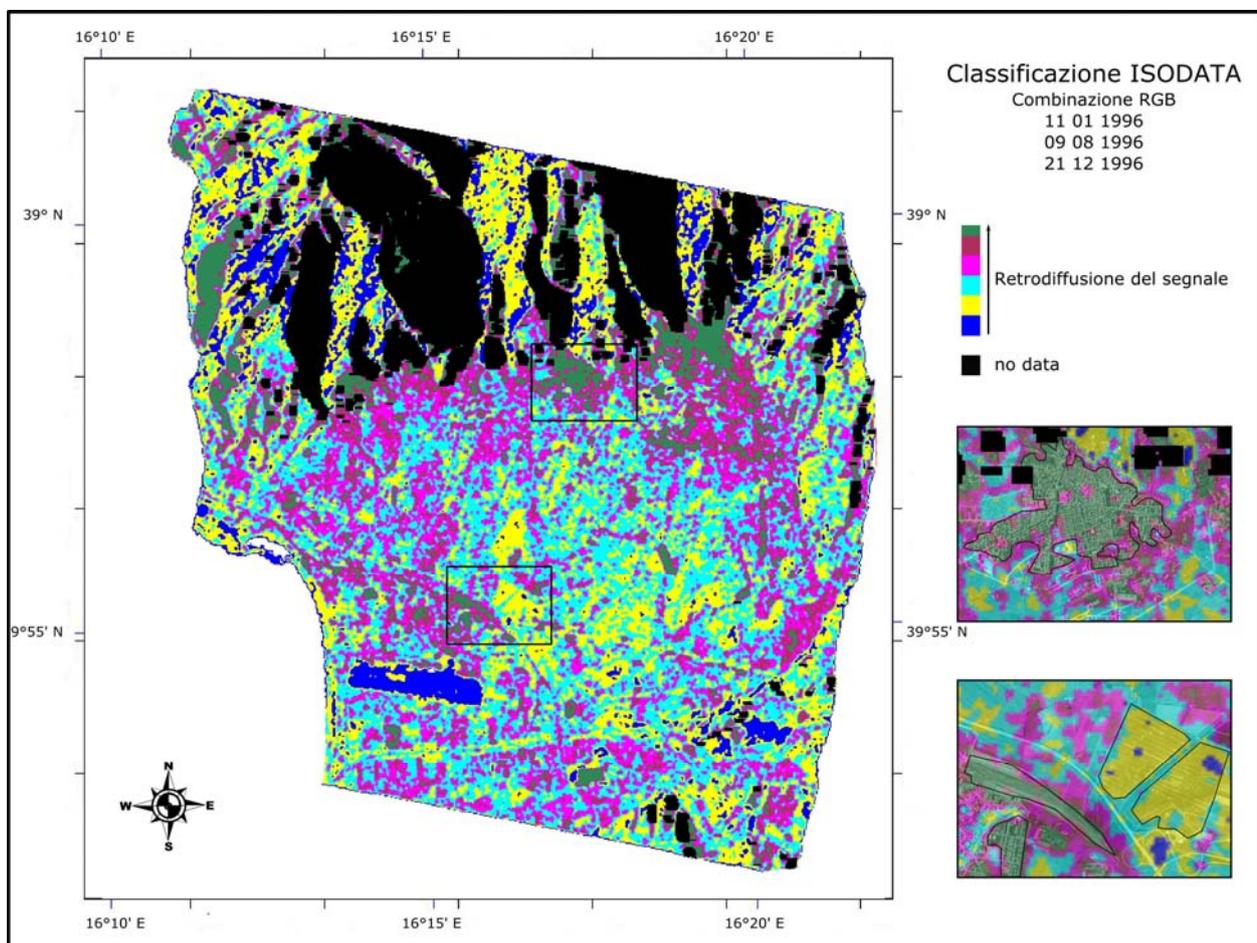


Figura 106. Classificazione ISODATA dei dati derivati dalla combinazione RGB di 3 immagini SAR (11 gennaio, 9 agosto e 21 dicembre 1996).

È rappresentata in scala di colore la maggiore o minore intensità di retrodiffusione dei singoli pixel durante le 3 acquisizioni. In nero le zone non coperte dal satellite. È possibile isolare superfici con le stesse caratteristiche di retrodiffusione per analisi di classificazione.

Nella Figura 106 è mostrato un esempio di come una classificazione di tipo ISODATA consenta il raggruppamento in classi di superfici con caratteristiche tali da generare la stessa intensità di retrodiffusione. La classificazione Isodata è un tipo di classificazione “non supervisionata”. Si tratta di una procedura iterativa in cui, in base alla scelta di alcuni parametri iniziali definiti dall’operatore, si individuano dei cluster di confronto nei quali i vari pixel vengono collocati secondo un criterio di somiglianza. Ad ogni iterazione l’assegnazione dei pixel viene ricalcolata in base alle caratteristiche dei cluster più vicini, finché non si raggiunge un numero di ricollocazioni minore di una soglia scelta dall’operatore. Nell’algoritmo Isodata il numero di cluster può variare durante l’iterazione, (Tou, 1974).

Multidifference: in analisi di tipo multidifference sono necessarie solo due acquisizioni. Anche questo tipo di classificazione consente analisi di tipo change detection o di classificazione del territorio in un intervallo di tempo determinato. La tabella 5.4 riassume in modo sintetico le possibili combinazioni e i colori RGB derivati dalla combinazione multidifference tra due acquisizioni. Ovviamente differenti altre sfumature di colore intermedio sono possibili.

input 1 – input 2 (red)	input 2 (green)	input 1 (blue)	Color
bassa	alta	alto	Cyan
alta	alta	basso	Yellow
alto	basso	alto	Turquoise

Tabella 5.4 Definizione della tabella colore relativa al valore della variazione della retrodiffusione tra due acquisizioni.

La Figura 107 mostra due combinazioni RGB multidifference relative a coppie derivate dalla combinazione di immagini acquisite rispettivamente il 16 Maggio, il 25 Luglio 1993 ed il 9 Novembre 1993. Le stesse sono state combinate in modo che la prima coppia copra essenzialmente il periodo estivo (Maggio – Luglio) e la seconda un periodo più lungo (Maggio – Novembre). Ciò per verificare l’eventuale opportunità di ottenere informazioni su cambiamenti delle superfici di retrodiffusione e desumere informazioni di classificazione qualitativa per il territorio in studio. Essa permette di fare differenti osservazioni. La prima concerne le aree di colore ciano. Infatti, gli edifici con elevata retrodiffusione presenteranno una variazione della stessa bassa ed un valore alto nelle due singole acquisizioni. Per cui le aree con questo colore sono sicuramente ascrivibili alle aree urbane o a target costituiti per esempio da affioramenti di roccia o terreno brullo.

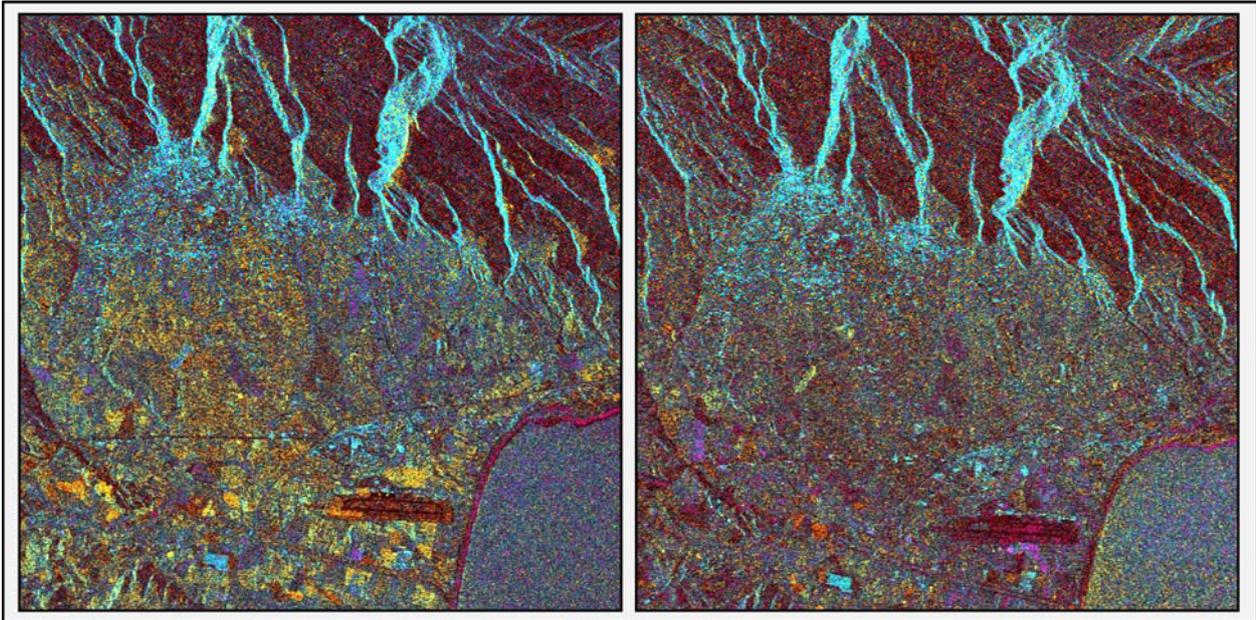


Figura 107. Combinazione RGB multidifferenza di due coppie di immagini in geometria slant range.

A sinistra coppia 19930516-19931109; a destra coppia 19930516 – 19930725. Le aree urbane si presentano in ciano. Si può notare come l'immagine di sinistra presenta come motivo principale differenti aree di colore giallo che testimoniano una differenza più marcata di retrodiffusione rispetto all'immagine di destra.

Inoltre nell'immagine di sinistra che copre un periodo di tempo più lungo di quella di destra si nota la presenza marcata di zone in giallo. Questo fa supporre che nell'acquisizione di novembre quei terreni presentavano un valore di retrodiffusione più alto rispetto sia a quella di maggio che di luglio. Questo potrebbe derivare dall'aridità delle superfici o dal fatto che le stesse siano state per esempio arate. Osservazione opposta può essere fatta per le aree in turchese.

Cartografia ILU: per fare classificazioni di tipi ILU (Interferometric Land Use), (par 4.2.4), si devono analizzare due immagini di intensità e una di coerenza derivata dall'analisi interferometrica delle due immagini precedenti. Successivamente l'immagine RGB di output presenterà generalmente nel canale Rosso la coerenza, nel verde l'intensità media tra le due acquisizioni e nel Blu la differenza di intensità. Un esempio di questo tipo di elaborazione è presentata nella Figura 108.

La mappa permette di discernere agevolmente il territorio urbanizzato (zone in arancione) da quello coperto dalla vegetazione spontanea o coltivato.

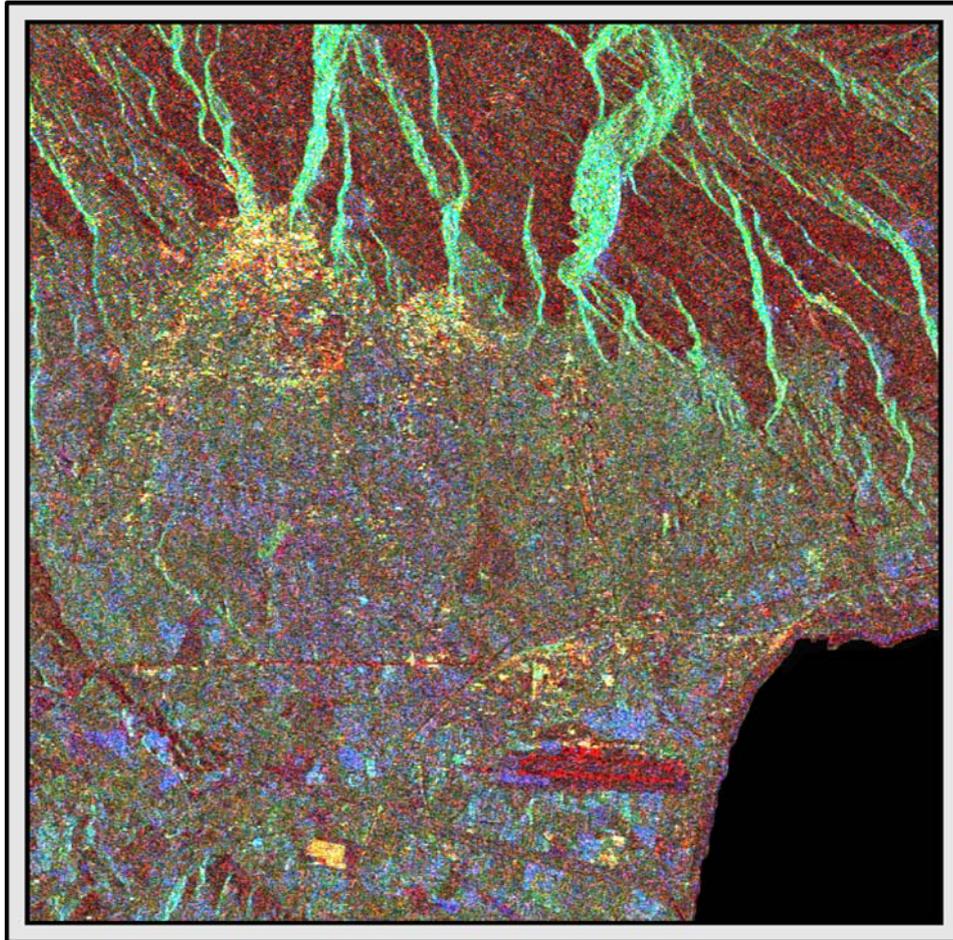


Figura 108. Immagine ILU 19930725 - 19931109.

È possibile distinguere in arancione i bersagli sul territorio che presentano tra le due acquisizioni coerenza alta (R), ampiezza media del segnale alta (G), differenza di ampiezza (B) bassa: edifici, terreno spoglio. In sfumature di verde la vegetazione fissata e in blu aree con differenza di retrodiffusione alta tra le due acquisizioni. Quest'ultimo colore potrebbe derivare dalla maggiore umidità nei terreni relativi all'acquisizione di novembre.

Dai dati di classificazione di questo tipo possono per esempio essere ricavate informazioni sulla suscettività all'incendio che, sovrapposti agli esistenti tematismi vettoriali sulle reti infrastrutturali e sui limiti delle aree in frana, potrebbero fornire importanti indicazioni riguardo ad aree in cui probabili inneschi di fenomeni di trasporto solido investirebbero strutture a rete.

5.4 Conclusioni

In questo capitolo sono stati illustrati sia i prodotti principali generati più direttamente dal processamento DInSAR e cioè gli interferogrammi in geometria slant range che quelli “*accessori*” costituiti da Modelli Digitali di Superficie e Mappe di Classificazione. Si è constatata l'estrema versatilità dei dati SAR che consentono, con l'acquisizione di una sola tipologia di prodotti, di ottenere sia informazioni quantitative che qualitative del territorio investigato. Sulle mappe di deformazione in geometria slant range è stato possibile isolare aree su cui le variazioni dei segnali di fase interferometrica spingevano a predisporre investigazioni più spinte approntate poi nel capitolo 6. Per la generazione di questo tipo di dati è stata messa a punto una procedura operativa originale fine ad integrare i software SARscape e SHISSOR. Questa, seppur rappresenta ancora una metodologia sperimentale, è stata validata su casi di studio a deformazione nota ed ha consentito l'utilizzo completo della banca dati a disposizione. Le informazioni fornite, seppur in geometria slant range e quindi non interpretabili da utenti non abituati all'analisi interferometrica differenziale, costituiscono attualmente osservazioni nuove per le aree di studio. Non bisogna tuttavia sottovalutare la necessità di ulteriori validazioni della procedura su target differenti. L'utilizzo della stessa tecnica per la generazione di DSM e i riscontri ottenuti dal confronto con DTM esistenti, ha mostrato l'utilità della stessa per l'ottenimento di dati di elevazione che vanno ad incrementare la banca dati delle informazioni di questo tipo disponibili oggi per il territorio in esame. Attualmente, si è potuto constatare che, a dati acquisiti, in un tempo massimo di 2 ore è possibile generare DSM estesi (100 Km²) e con una collocazione temporale definita, utili a desumere informazioni tipiche derivate da questo tipo di prodotti: es. mappe di esposizione, di pendenza, ecc. Anche se i nuovi sensori TerraSAR-X in configurazione Tandem consentiranno di generare Modelli Tridimensionali di Superficie molto più precisi e con risoluzione a terra di 5 m, bisogna considerare che valutazioni corrette dei dati ottenuti e l'ottimizzazione del processamento non possono prescindere dalla combinazione di acquisizioni satellitari ascendenti e discendenti. Infine, sfruttando i prodotti intermedi dell'analisi interferometrica, matrici di ampiezza e coerenza, sono state generate, per la prima volta sul territorio di studio, carte di classificazione del suolo che, seppur non hanno costituito l'obiettivo principale della ricerca e quindi non sono state oggetto di analisi più spinte, possono favorire ad integrarla e risultare utili come base di partenza per analisi preliminari di caratterizzazione del territorio: studi di pianificazione, sviluppo urbano, ecc.

Capitolo 6. Integrazione dei dati SAR in ambiente GIS

I paragrafi che seguono illustrano il trattamento dei dati interferometrici satellitari realizzato prima del loro utilizzo nell'analisi GIS, le specifiche tecniche delle banche dati realizzate e i dati di deformazione ottenuti sulle aree urbane e l'hinterland delle città di Lamezia Terme e Vibo Valentia. Questi ultimi sono stati ottenuti seguendo essenzialmente due approcci: qualitativo e semi-quantitativo. Successivamente, per due specifiche aree di studio, ritenute tra le più importanti, si sono volute fornire ulteriori indicazioni relativamente a possibili modelli deformativi e verosimili scenari di rischio. Particolarità operative, utilizzate per ottenere un migliore isolamento e una più conveniente leggibilità dei dati, hanno consentito di produrre sia mappe qualitative, indicative di trend di movimento e quindi più utili all'individuazione diretta di fenomeni deformativi, che mappe semi-quantitative adeguate a quantizzare i tassi di spostamento nella direzione di massima deformazione attesa. Le osservazioni puntuali hanno riguardato fondamentalmente 5 siti: Lamezia Terme (Nicastro-San Biase); l'aeroporto di Sant'Eufemia; Vibo Valentia; Vibo Marina; Pizzo Calabro. Le mappe hanno consentito di ricavare sia informazioni non attualmente riportate sulle cartografie ufficiali delle aree ad alto rischio idrogeologico che di confermare quelle esistenti apportando, in questo caso, maggiori indicazioni relativamente ai confini delle stesse. Osservazioni del tutto originali sono poi state fatte relativamente a possibili modelli deformativi. Infatti, i dati forniti dalle deformazioni di superficie, incrociati con quelli di altro tipo e derivati da differenti osservazioni, portano a ipotesi di modelli deformativi convergenti e consentono di approntare nuovi scenari di rischio.

6.1 Trattamento dei dati interferometrici satellitari

Calcolo delle componenti LOS della deformazione

Il dato interferometrico, ricavato attraverso le procedure utilizzate, fornisce, per ciascun pixel che abbia superato il filtraggio della coerenza, informazioni relative all'entità del movimento avvenuto in un determinato intervallo temporale. Tale misura, generalmente espressa in millimetri, è riferita alla direttrice satellite-bersaglio (LOS) detta anche slant-range. In questo

modo, è possibile dedurre la proiezione della componente di moto del bersaglio lungo la direzione di slant-range piuttosto che la componente di moto reale. In situazioni estreme, in cui il bersaglio analizzato si sia mosso in direzione normale alla direzione di slant-range, il satellite non percepirà alcun movimento. Inoltre, gli oggetti disposti sul terreno con pendenza pari all'angolo di off-nadir (parallela all'antenna del radar), risulteranno tutti rappresentati nella medesima cella di risoluzione senza la possibilità di essere discriminati. Per tutti gli altri casi, il valore eventualmente riportato sugli interferogrammi sarà positivo quando la componente di moto analizzata si allontana dal satellite, negativo quando si avvicina ad esso (Figura 109). Tuttavia, le informazioni desunte si discostano da quelle normalmente utilizzate nella cartografia tradizionale. Esse riportano solamente una componente del moto effettivamente avvenuto, che in alcuni casi può essere nulla o non quantificabile nonostante il bersaglio abbia subito uno spostamento. Ne consegue che gli interferogrammi prodotti, non sono direttamente confrontabili con i dati di monitoraggio convenzionale (inclinometri, piezometri, GPS) e/o derivati dal più tradizionale rilevamento geomorfologico e geologico-tecnico. Per superare queste limitazioni e trasformare tali valori in spostamenti reali lungo la verticale o la linea di massima pendenza del versante è stato necessario un ulteriore step di elaborazione.

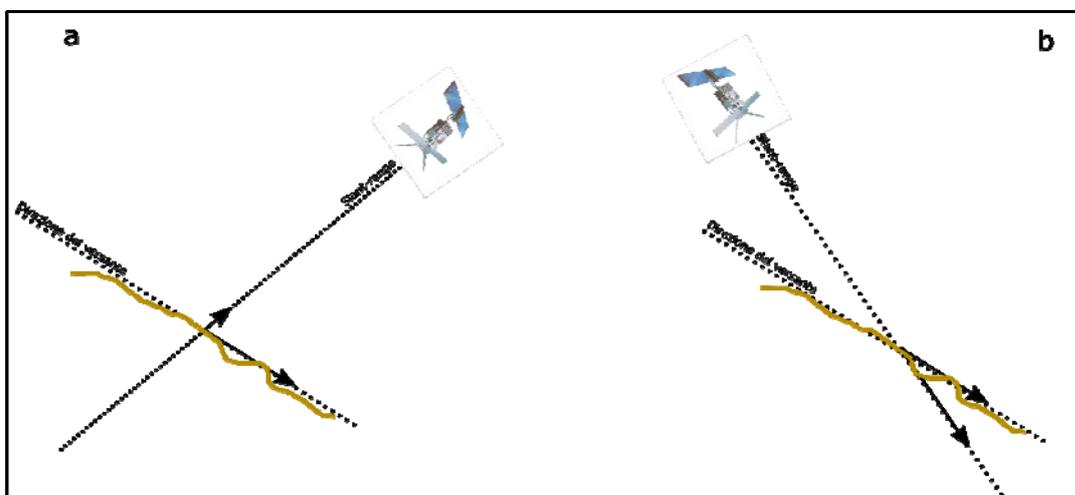


Figura 109. Rappresentazione grafica delle geometrie di acquisizione SAR.

Queste portano alla produzione di dati con valore negativo (a) e con valore positivo (b) rispettivamente proporzionale alla diminuzione o all'aumento dei valori di fase interferometrica.

Tutti i dati ottenuti sono stati *re-importati* in SARscape per essere ricalcolati attraverso un tool che permette di trasformare i dati interferometrici, in prodotti confrontabili con i dati riportati sulla cartografia tradizionale attraverso la proiezione del vettore movimento sia verticalmente che lungo la linea di massima pendenza di un versante. Lo script implementato opera tali

proiezioni tenendo in considerazione: posizione di slant-range definita dai valori di heading (angolo sotteso fra la direzione del Nord e la direzione di vista del satellite) e di look angle (angolo sotteso fra la direzione di vista del satellite e la direzione di Nadir) forniti con le immagini, acclività e orientazione del versante, azimuth della linea di vista del satellite, angolo di foreshortening (angolo centrato sulla verticale della LOS all'interno del quale non è possibile derivare valori esatti di spostamento), (Figura 110). L'output è rappresentato da carte di spostamento con componenti calcolate lungo la linea di massima pendenza del versante e verticalmente.

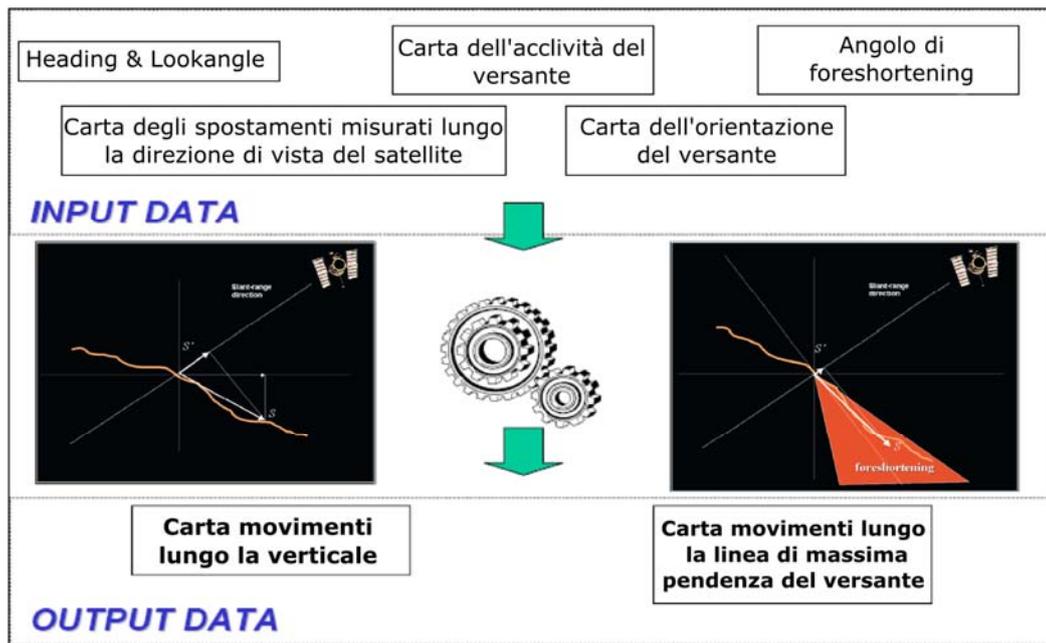


Figura 110. Schematizzazione del procedimento utilizzato per ricavare i valori reali di spostamento del terreno.

Per dedurre, dal dato interferometrico, la componente di moto proiettata è necessario conoscere la posizione della direttrice lungo la quale il bersaglio osservato si è effettivamente spostato. Per i fenomeni di subsidenza, la direzione del moto, è facilmente intuibile. Essa è coincidente con la direzione di nadir. Più difficile la deduzione della direzione di moto di un corpo di frana, al cui stesso interno si verificano frequenti variazioni della direzione di movimento. I dati per noi disponibili sui fenomeni di dissesto non avrebbero permesso di dedurre l'effettiva direzione del moto. Perciò, questa è stata approssimata come coincidente con quella di massima acclività. Anche se rappresenta una semplificazione del problema, questo assunto, introduce errori minimi, soprattutto se si effettuano studi a piccola scala su vaste aree (Pellegrini, 2004). Su questa base, sono state generate le mappe di deformazione in cui sono rappresentati i dati interferometrici

utilizzabili. Questo tipo di elaborati descrive per ciascun pixel lo spostamento in millimetri secondo la verticale o lungo la direzione di massima acclività del versante.

Trattamento dei dati con isolamento valori più significativi.

I dati così ottenuti possono essere confrontabili direttamente con i dati ancillari di deformazione inseriti in un database cartografico. Tuttavia, la lettura di questi prodotti risulta ancora di difficoltosa interpretazione. Infatti, su alcune aree delle immagini, la scelta di soglie di coerenza che consentono al programma di lavorare in modo ottimale, preservano i valori di fase in modo sparso. Quindi, per facilitare la comprensibilità dei prodotti generati e depurarli dai valori che potrebbero costituire incertezze nella misura, è stato utilizzato un ulteriore step di processamento in ambiente ENVI. È stata utilizzata una metodica di filtraggio dei dati basata su operatori di vicinanza. In pratica, i dati ottenuti sono trattati attraverso un filtro di tipo “Bit Error” (Eliason et al. 1990). Questo rimuove quei dati che solitamente rappresentano pixel isolati e con valori indipendenti che conferiscono alla scena il tipico aspetto di “sale e pepe”, (Figura 111).

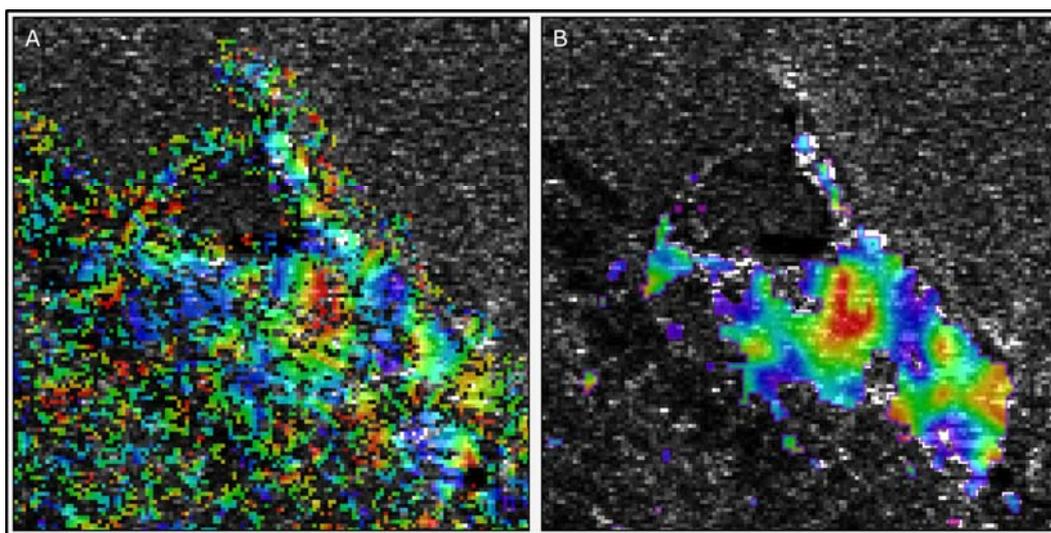


Figura 111. Un interferogramma relativo al sito di Vibo Marina in geometria slant range.

In A interferogramma non filtrato con il tipico motivo “sale e pepe”. In B lo stesso interferogramma dopo le operazioni di filtraggio (Bit Error), media e interpolazione.

Il filtro utilizza una procedura adattabile per sostituire un preciso pixel con la media dei pixel vicini. Le statistiche locali (media e scarto quadratico medio) all'interno di una finestra di dimensioni specifiche, scelte dall'utilizzatore, sono usate per regolare la soglia dei pixel validi. Questo ha permesso di eliminare pixel isolati e mediare le variazioni di valore su pixel adiacenti, rendendo il risultato delle elaborazioni interferometriche meglio interpretabile (Figura 111).

Finalmente, questa procedura ha consentito di integrare in una banca dati GIS e di rendere meglio fruibili i dati finali del processo di elaborazione interferometrico, così come saranno successivamente illustrati nel capitolo. Il database predisposto, oltre ai dati derivati dall'osservazione SAR, ha compreso anche quelli forniti principalmente dall'Autorità di Bacino della Regione Calabria, differenti dati tecnici recuperati e desunti durante osservazioni effettuate nel corso del progetto e quelli cartografici di base della Regione Calabria. Lo scopo è stato quello di porre le basi di un sistema di supporto alla validazione ed all'interpretazione dei dati interferometrici stessi.

6.2 Banca dati

Contenuto

I prodotti interferometrici satellitari di output, realizzati con pixel size di 25 x 25 m, sono stati geocodificati ed implementati in un database che insieme agli altri layer informativi disponibili più rappresentativi sono descritti di seguito:

- Dati derivati da Interferometria SAR satellitare

I file derivati dalle acquisizioni dei satelliti ERS-1/2 ed ENVISAT, elaborati attraverso le procedure descritte sono stati geocodificati, esportati in formato raster (tif) e vettoriale (shp) per essere implementati nella banca dati GIS;

- Cartografia tecnica dei fenomeni franosi

I file grafici relativi ai fenomeni franosi sono stati derivati dal database dell'Autorità di Bacino Regionale, dall'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (*Progetto IFFI*) e per la specifica area del vibonese anche dal WebGis della Carta Inventario dei Movimenti Franosi della Provincia di Vibo Valentia (<http://www.terraeacqua.eu/>). In alcune aree campione sono stati eseguiti rilevamenti a terra, finalizzati a verificare l'attendibilità delle cartografie tecnico-geomorfologiche a disposizione.

- Carte degli effetti dei dissesti su elementi antropici

Per aree ristrette sono stati eseguiti specifici rilievi finalizzati all'identificazione di edifici e di altre infrastrutture, con evidenti lesioni (gravi e meno gravi) o con evidenze d'interventi di consolidamento. Questo rilievo ha avuto lo scopo di censire la localizzazione di tali manufatti, senza entrare nel merito della tipologia di lesione. Il loro utilizzo è pertanto da intendersi finalizzato ad una validazione di tipo qualitativo dei risultati desunti dal monitoraggio interferometrico dei centri abitati oggetto d'analisi.

- Dati cartografici Regione Calabria

All'inizio del lavoro di tesi, il Centro Cartografico regionale ha fornito diversi prodotti cartografici digitali che insieme agli altri elementi costitutivi del database sono riassunti nella tabella 6.1

Tematismo	Scala nominale	Modello dato
Carta topografica IGM	1: 50000	raster (.tif)
Carta topografica IGM	1:25000	raster (.ecw)
Carta topografica IGM	1:10000	raster (.tif)
Carta geologica (Casmez)	1:25000	raster (.jpeg)
Modello Digitale del Terreno	maglie 40 x 40 m	raster (.asc)
Ortofoto volo IT 2000	-	raster (.asc)
Strati Riferimento prioritari “DBPrior10K”	1:10000	vettoriale (.shp)
Perimetrazione zone R3-R4 (PAI)	1:10000	vettoriale (.shp)
Modello Digitale di Superficie (SRTM)	maglie 90 x 90 m	raster (.hgt - ENVI)
Modello Digitale di Superficie (SAR)	maglie 25 x 25 m	raster (slm – SARscape)
Mappe di deformazione (SAR)	maglie 25 x 25 m	raster (.tif)
Punti di deformazione (SAR)	-	(.shp)
Carte di dissesto (IFFI)	-	raster (.jpeg)
Carte di dissesto (WebGIS Prov. VV)	-	raster (.tif)
Carta dell’esposizione dei versanti	maglie 40 x 40 m	raster (.tif)
Carta delle pendenze	maglie 40 x 40 m	raster (.tif)

Tabella 6.1. Prodotti cartografici acquisiti, generati e inseriti nel database. In verde quelli forniti direttamente dal Centro Cartografico Regionale.

Formato e struttura della banca dati

- Sistema di coordinate

Tutti gli elaborati acquisiti o generati sono stati geocodificati e proiettati secondo i parametri del sistema cartografico di riferimento riassunti in tabella 6.2:

Denominazione del Sistema Cartografico di riferimento	UTM-WGS84 – fuso 33
Proiezione	Universale Trasversa di Mercatore
Ellissoide	WGS84
Datum Geodetico	ETRF89

Tabella 6.2. Parametri del sistema di proiezione

- Struttura della Banca Dati

Per ottenere un prodotto il più possibile completo e di facile consultazione, sono stati creati essenzialmente tre database a differente copertura spaziale: uno globale con la totale copertura spaziale del territorio compreso tra le città di Lamezia Terme e Vibo Valentia e due più specifici centrati solo sulle aree più urbanizzate dei due comuni. In questi ultimi sono stati implementati, in modo separato, i dati relativi all'analisi interferometrica al fine di facilitare la gestione di importanti volumi di dati.

Il primo database a copertura "regionale" contiene i dati di base (raster e vettoriali) forniti nel corso delle prime fasi del progetto. Ciò ha consentito di agevolare l'inquadramento e la gestione di quei dati che sarebbero derivati nelle diverse fasi di elaborazione. Il secondo database contiene i dati (raster e vettoriali) derivati dall'elaborazione interferometrica vera e propria.

6.3 Analisi dei dati interferometrici

L'analisi e la validazione dei dati interferometrici differenziali non è tuttora una procedura codificata a livello operativo. Nell'ambito del progetto sono stati sviluppati ed applicati ad ogni area campione un approccio qualitativo e semi-quantitativo.

6.3.1 Approccio qualitativo

Un preliminare approccio di tipo qualitativo è stato ritenuto molto utile per le successive, più accurate valutazioni quantitative. Esso è stato basato su un'analisi descrittiva degli interferogrammi proiettati secondo la linea di vista del satellite (LOS) e mediati (Par. 6.1). Infatti, questi possono ben rappresentare l'eventuale trend generale di movimento di porzioni ampie di terreno sia concernenti subsidenze che fenomeni franosi. In questa fase si è voluto verificare se i dati di deformazione di output erano confrontabili, dal punto di vista spaziale, con le cartografie tecniche di riferimento (PAI, IFFI, ecc) e quelle relative alle lesioni di edifici e infrastrutture. Ciò ha consentito valutazioni qualitative relative sia alla verosimiglianza con i dati disponibili che all'apporto di nuove inedite informazioni. Non essendo possibile mostrare integralmente i risultati, nelle 3 immagini successive sono presentati alcuni esempi per l'area urbana di Vibo Valentia ed il suo hinterland.

Per la città di Vibo Valentia (Figura 112), in vari interferogrammi indipendenti, sono stati registrati segni di deformazione su diverse zone collocate al limite dell'ampio versante che con notevoli pendenze raccorda la linea di costa con i circa 500 m.s.l.m. cui è collocata la cittadina. In particolare l'osservazione ha riguardato un'ampia area compresa tra Viale J.F. Kennedy, Via Cannello Rosso e Viale Cassiodoro oltre a due più piccole aree in deformazione: una in zona Affaccio (viale Giovanni XXIII) e l'altra subito a Nord del presidio Ospedaliero Jazzolino. Le osservazioni fatte sono confrontabili con le aree a elevato rischio di frana conosciute. In ogni modo, bisogna tenere presente che essendo le informazioni di deformazione disponibili solo sulle aree coerenti ed, in questo caso, quindi solo sugli edifici, le osservazioni fanno presupporre che queste aree in frana trasferiscono i propri effetti sulle aree urbanizzate immediatamente confinanti.

Per la zona urbana di Vibo Marina (Figura 113) le osservazioni fatte concernono essenzialmente due aree. La prima è compresa tra via Stazione e Via Michele Bianchi che interessa lotti di terreno destinati ad edilizia turistico-residenziale. La seconda è posta immediatamente a Nord dello stabilimento Italcementi. In entrambe le aree è possibile osservare la presenza di infrastrutture di collegamento come per esempio la linea ferroviaria. Per queste aree le osservazioni fatte sembrano inedite considerato che sulle carte tecniche a disposizione non esiste nessun indicazione di fenomeni di subsidenza in atto.

Relativamente al Comune di Pizzo (Figura 114) la maggior parte delle osservazione riscontrate in differenti interferogrammi riguarda principalmente un'area a ridosso del bivio principale che dalla S.S. 18 permette l'immissione nel centro della cittadina (Via S. Marcello). L'area in deformazione sembra discretamente ampia ed estesa fino ad interessare il versante immediatamente a valle di un tratto della linea ferroviaria.

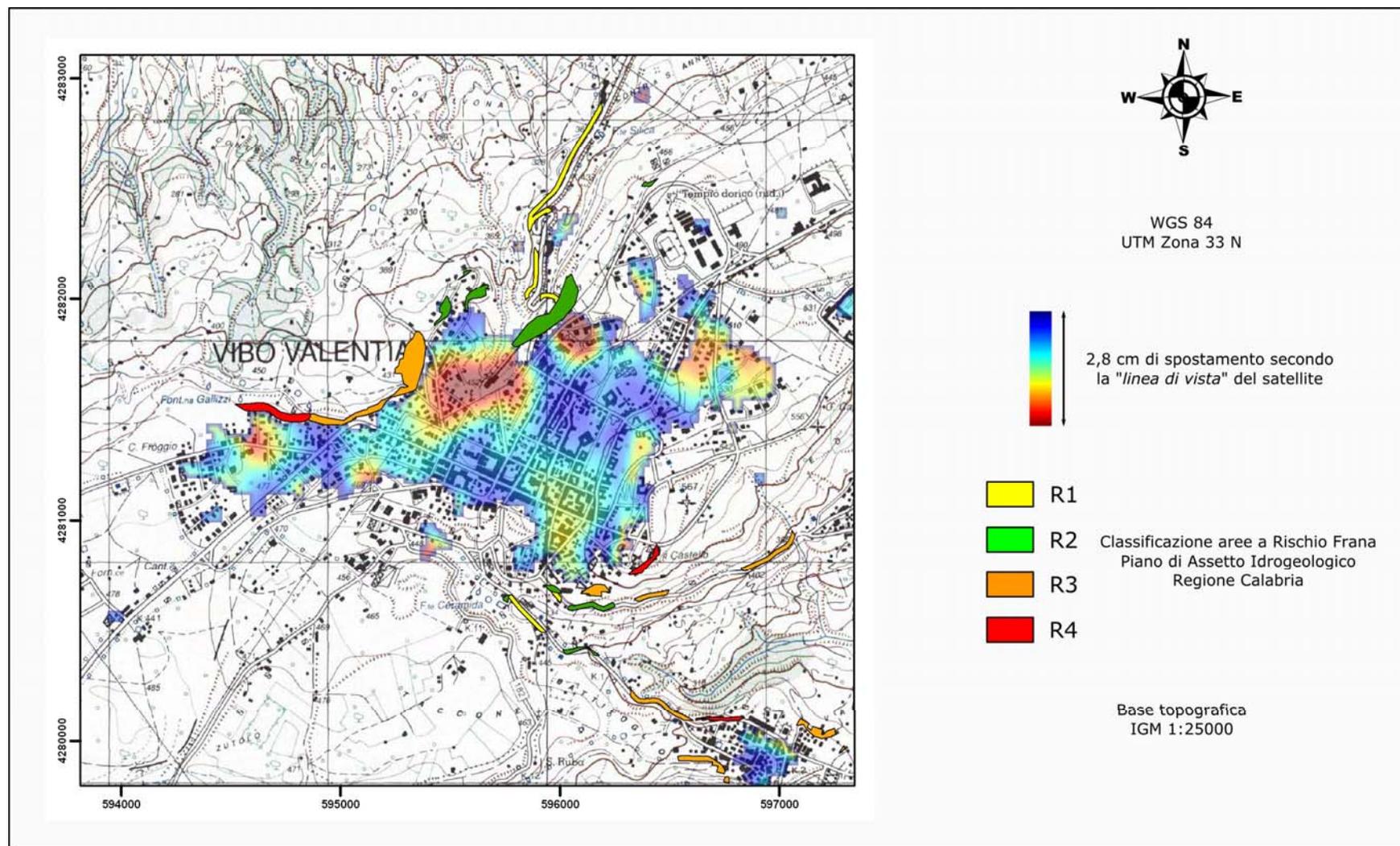


Figura 112. Interferogramma filtrato e geocodificato (11/93 - 01/97).

Sono indicate, in scala di colore, le variazioni di fase interferometrica misurate lungo la LOS. È possibile individuare spazialmente le aree a più rapida deformazione. In questo caso si può notare come i dati di deformazione forniti dall'interferometria SAR siano collocati a ridosso delle zone classificate ad alto rischio idrogeologico dal PAI Calabria. Alcuni punti a deformazione più rapida sono collocati a ridosso di importanti snodi della rete infrastrutturale cittadina.

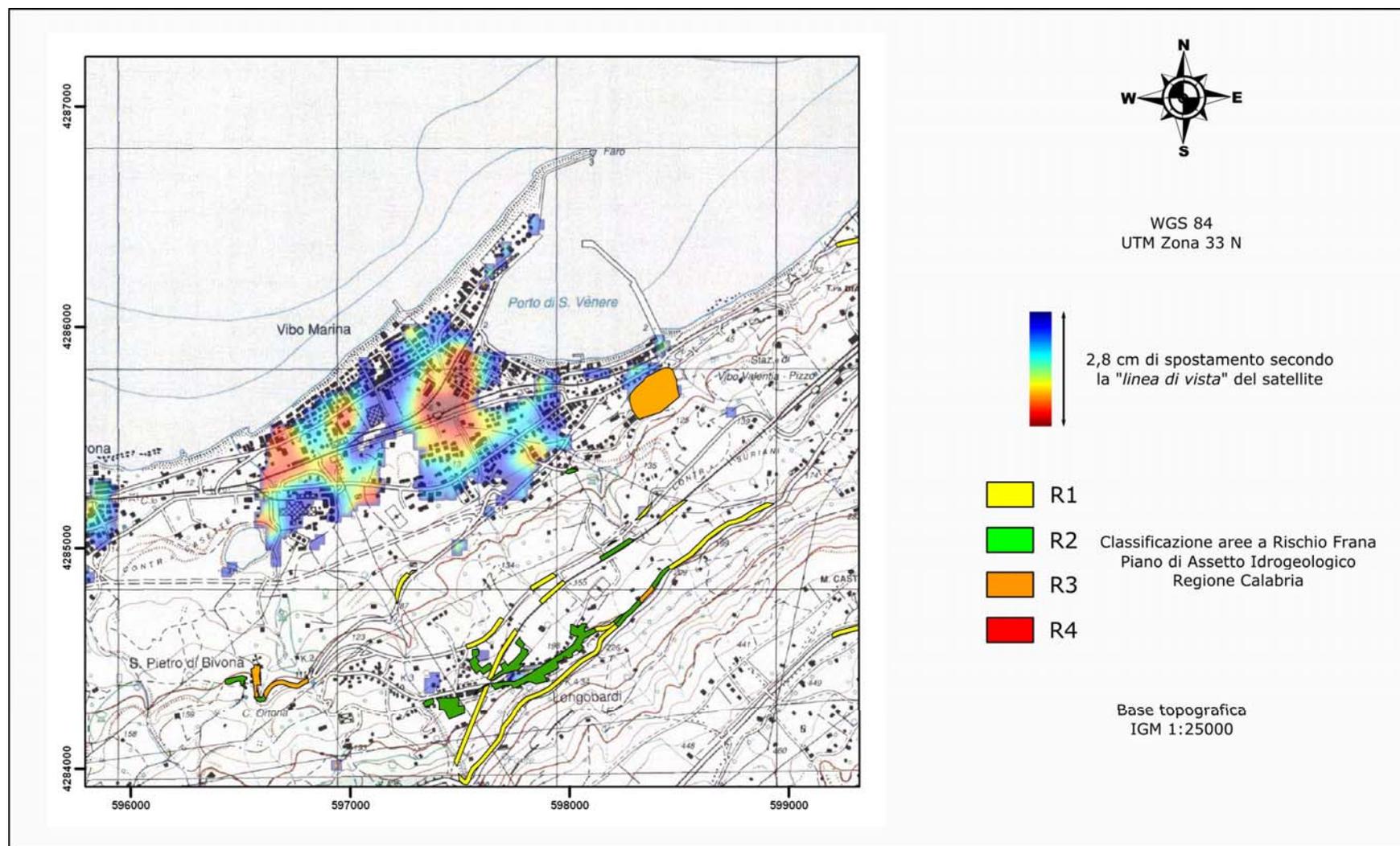


Figura 113. Interferogramma filtrato e geocodificato (08/95 – 07/97).

Sono indicate, in scala di colore, le variazioni di fase interferometrica misurate lungo la LOS. È possibile individuare spazialmente le aree a più rapida deformazione. In questo caso i dati di deformazione forniti dall'interferometria SAR non sono confrontabili con informazioni di dissesto catalogati e costituiscono un apporto d'informazione inedito. I siti in deformazione concernono anche in questo caso i tracciati di importanti infrastrutture di collegamento che insistono sul territorio in esame.

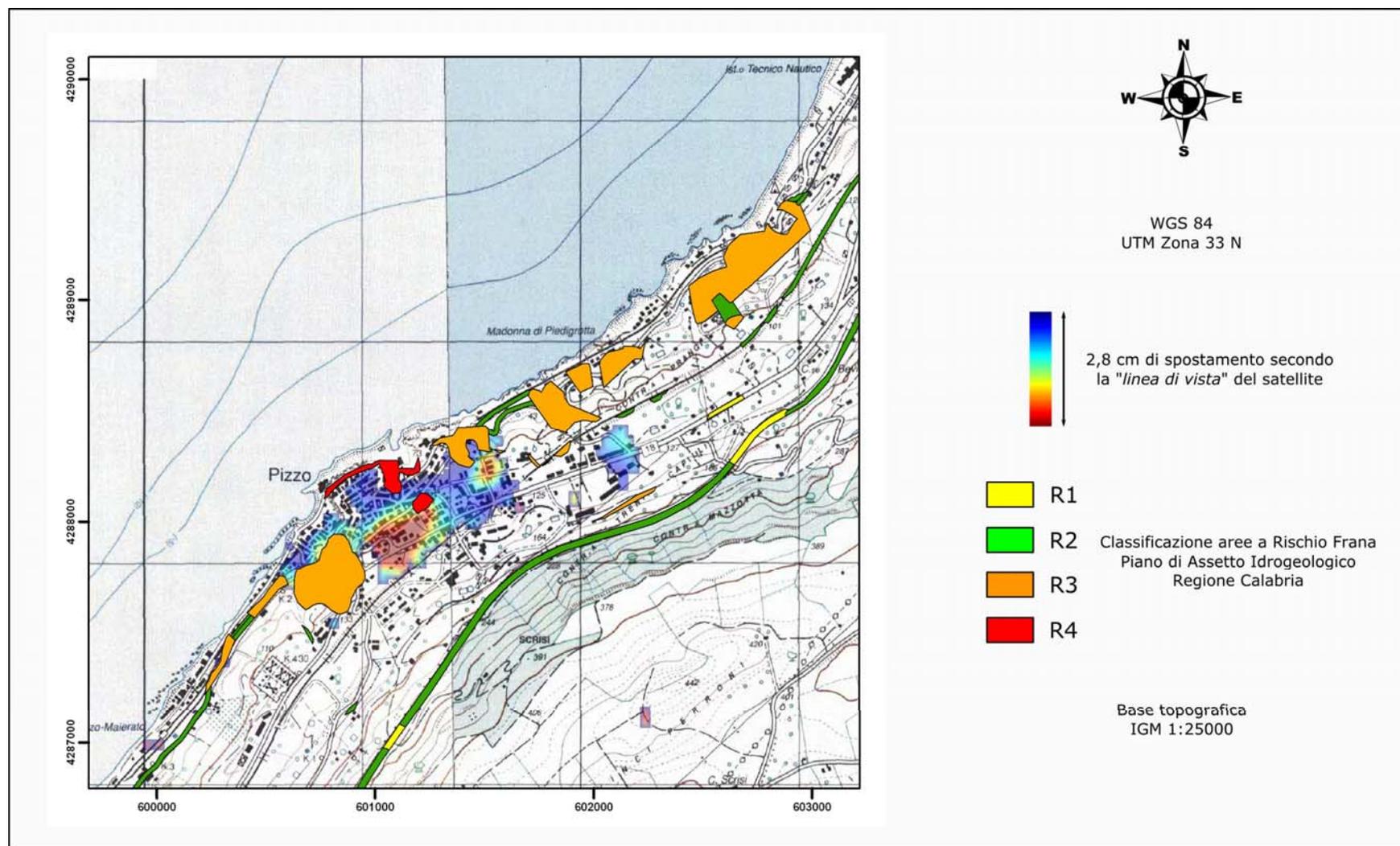


Figura 114. Interferogramma filtrato e geocodificato (08/95 – 08/98).

Sono specificate, in scala di colore, le variazioni di fase interferometrica misurate lungo la LOS. Sono indicate le aree a più rapida deformazione che non sembrano confrontabili con quelli conosciuti e catalogati ma vista la loro collocazione potrebbero essere d'aiuto per una più corretta valutazione dei confini delle aree di deformazione. L'area, osservata in diversi interferogrammi, concerne l'incrocio principale che permette l'immissione dalla statale 18 sulla rete stradale urbana.

6.3.2 Approccio semi-quantitativo

L'approccio semi-quantitativo ha invece costituito l'ultima fase dal lavoro di ricerca. I prodotti generati che rappresentano le componenti della deformazione sia verticalmente (subsidenze) che lungo la linea di massima pendenza del versante (frane), (par. 6.1), ci hanno permesso di fare valutazioni più accurate sull'entità delle deformazioni. I valori di fase assoluta calibrata e "srotolata" sono stati convertiti in spostamento e geocodificati nella proiezione desiderata attraverso la scelta di un vettore su cui lo spostamento lungo la LOS (Line of Sight) è stato proiettato (par. 4.2.1). Questo vettore nel caso di aree sub-pianeggianti è stato assimilato alla verticale mentre negli altri casi è stato proiettato secondo la linea di massima pendenza del versante, desunta dal Modello Digitale del Terreno fornito. L'operazione è stata eseguita fornendo punti di controllo (GCP) a terra individuati preventivamente su aree in cui le osservazioni generali, i rilievi di campagna e la bibliografia hanno fatto supporre l'assenza di movimenti al suolo degli di nota. Questi (GCP) sono stati utilizzati dal software per calcolare e rimuovere l'offset di fase e derivare quindi i dati di deformazione assoluta.

Gli spostamenti registrati derivati da questo tipo di prodotti possono essere più direttamente confrontati con quelli registrati in strumentazioni a terra di tipo inclinometrico o GPS in zone corrispondenti o prossime ai pixel rispetto ai quali questo dato interferometrico si riferisce. Bisogna sempre considerare le limitazioni di un eventuale confronto. Per esempio, il dato preso a riferimento negli inclinometri dovrebbe essere lo spostamento complessivo subito al piano campagna dalla bocca del tubo e non quello sulle principali superfici di scorrimento. Inoltre bisogna considerare che spesso gli strumenti a terra non ricadono nei pixel in cui sono forniti i dati e che può non esserci sovrapposizione temporale tra misure interferometriche e quelle GPS o inclinometriche.

Le successive figure 115 – 123 mostrano alcuni esempi rappresentativi dei dati generati. Le puntuali osservazioni registrate sono riportate nelle relative didascalie.

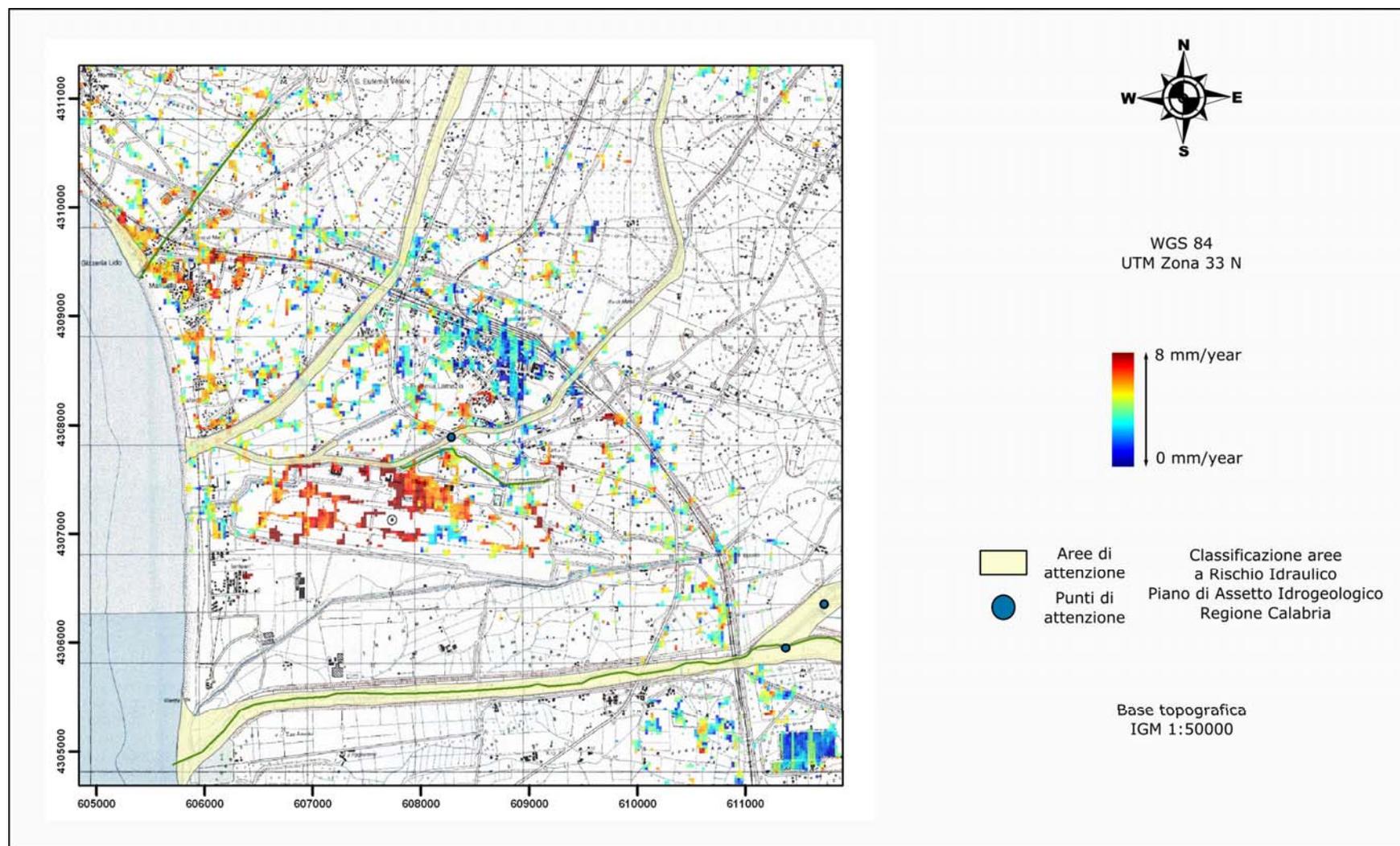


Figura 115. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all'interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19930727-20000121).

Sono indicate, in scala di colore, i valori di fase interferometrica assoluta proiettate lungo la perpendicolare al suolo. Risultano identificabili le aree che hanno registrato movimenti più significativi, assimilabili in questo caso a subsidenze e concernenti una fascia di territorio che comprende gli agglomerati urbani di Gizzeria Lido, Marinella e soprattutto la struttura aeroportuale collocata sull'area. Attualmente, le informazioni desumibili non risultano essere registrate o catalogate in altri studi. I confini dei dati deformativi sembrano allinearsi lungo un elemento strutturale che appare coinvolgere insediamenti abitativi e le infrastrutture di collegamento presenti: tratti dell'autostrada SA-RC e della ferrovia Tirrena-Inferiore nonché le strutture dell'Aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme.

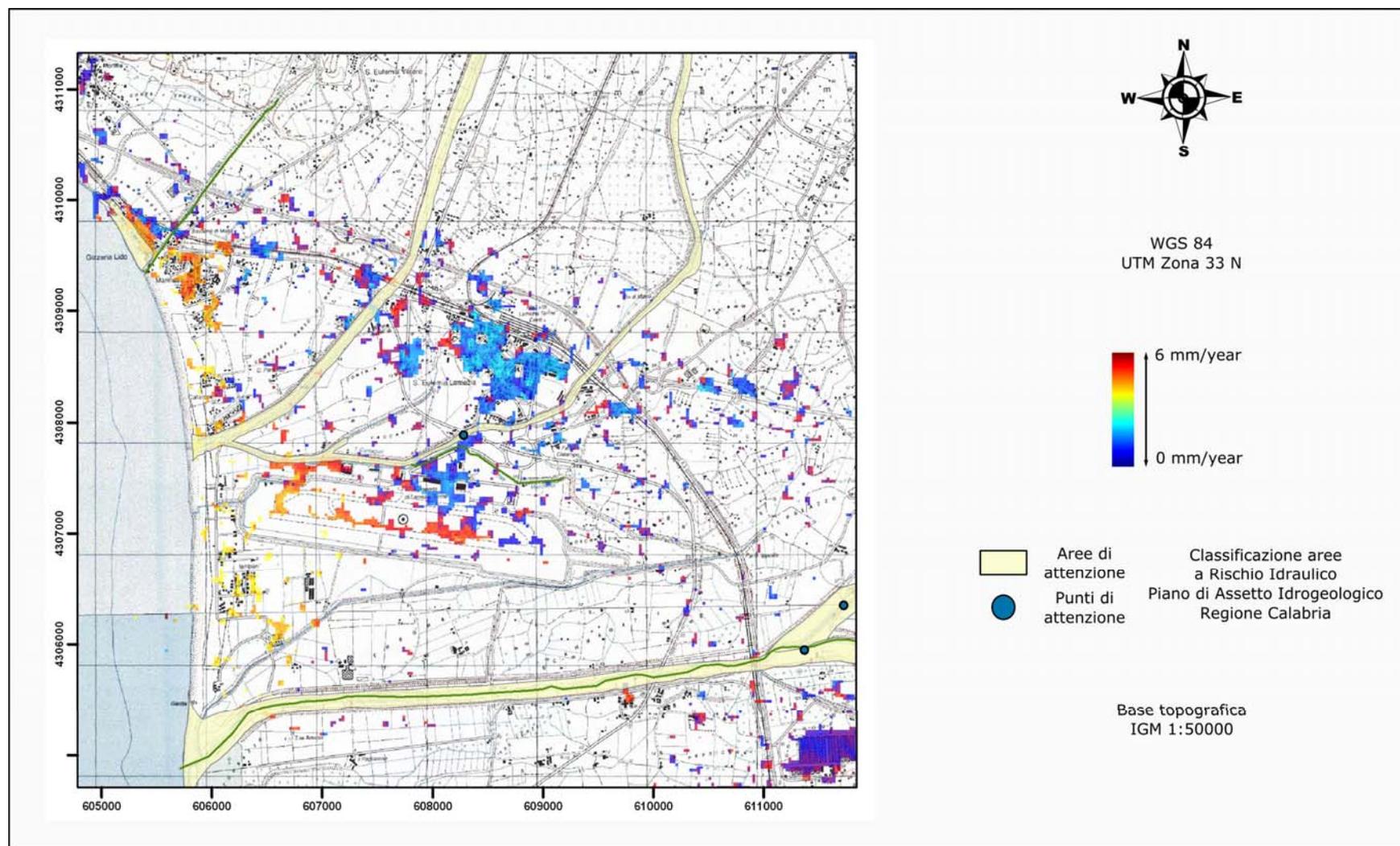


Figura 116 Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all'interferogramma filtrato e geocodificato (ENVISAT: 20030305-20050916).

Sono indicate, in scala di colore, i valori di fase interferometrica assoluta proiettate lungo la perpendicolare al suolo. Anche su questa mappa, si possono identificare aree a deformazione più significativa (subsidenze) concernenti la stessa fascia di territorio osservata precedentemente seppur in questo caso almeno l'infrastruttura relativa all'Autostrada SA-RC sembra non essere interessata. Analogamente i confini dei dati deformativi sembrano disporsi lungo un elemento strutturale che appare coinvolgere gli abitati di Gizzaria Lido, Marinella, la ferrovia Tirrena-Inferiore nonché le strutture dell'Aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme.

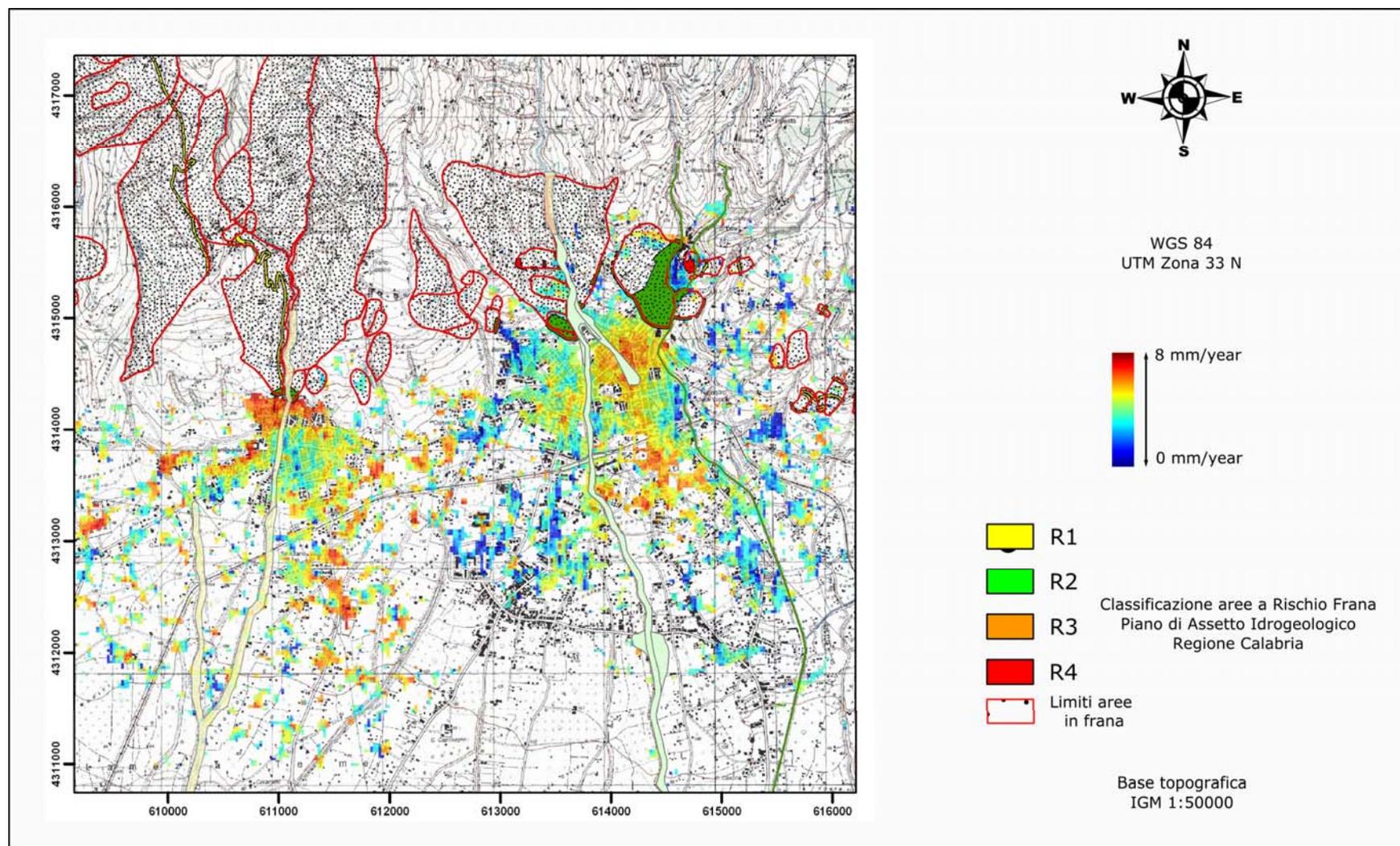


Figura 117. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all'interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19930727-20000121).

Sono indicate, in scala di colore, i valori di fase interferometrica assoluta proiettate in questo caso secondo la linea di massima pendenza del versante. Risultano identificabili aree a velocità di deformazione più significative, in questo caso ascrivibili più direttamente a movimenti lungo pendii, già registrate e catalogate in letteratura, nell'area a N dell'abitato di San Biase in corrispondenza del torrente Cantagalli. Inoltre zone in deformazione riguardano l'abitato di Nicastro in un'area collocabile tra i torrenti Piazza a Canne. Queste ultime informazioni desunte sembrano risultare inedite.

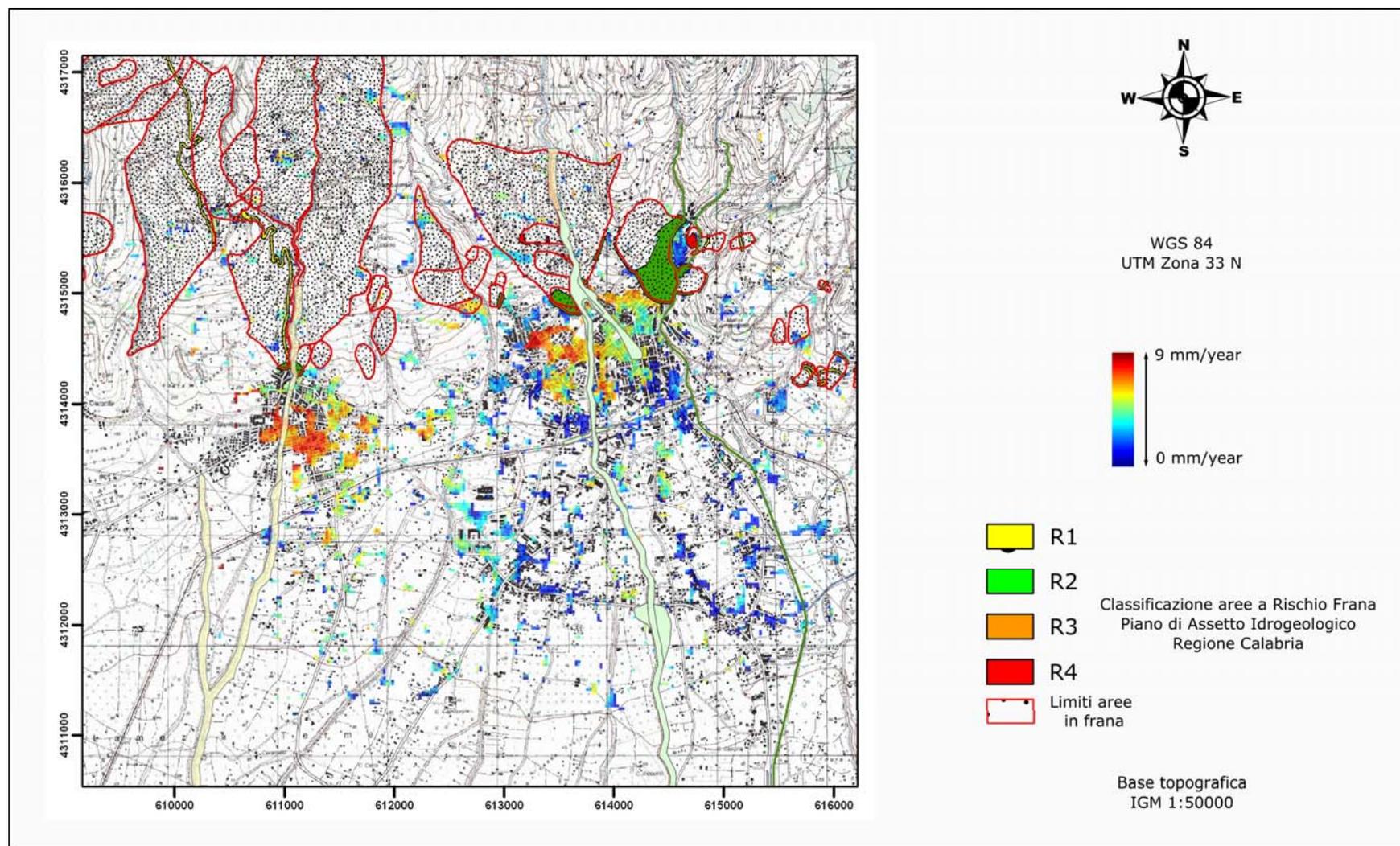


Figura 118. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all'interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931005-19980814).

Sono indicate, in scala di colore, i valori di fase interferometrica assoluta proiettate in questo caso secondo la linea di massima pendenza del versante. Anche in questo caso, possono essere identificate aree a velocità di deformazione più elevata, concernenti movimenti lungo pendii, più direttamente concernenti l'abitato di San Biase in corrispondenza del passaggio del torrente Cantagalli che presumibilmente costituisce un elemento morfologico-strutturale di richiamo per i terreni circostanti. Inoltre zone in deformazione riguardano l'abitato di Nicastro in un'area più estesa della precedente e collocabile a ridosso del fosso Fella e del torrente Piazza.

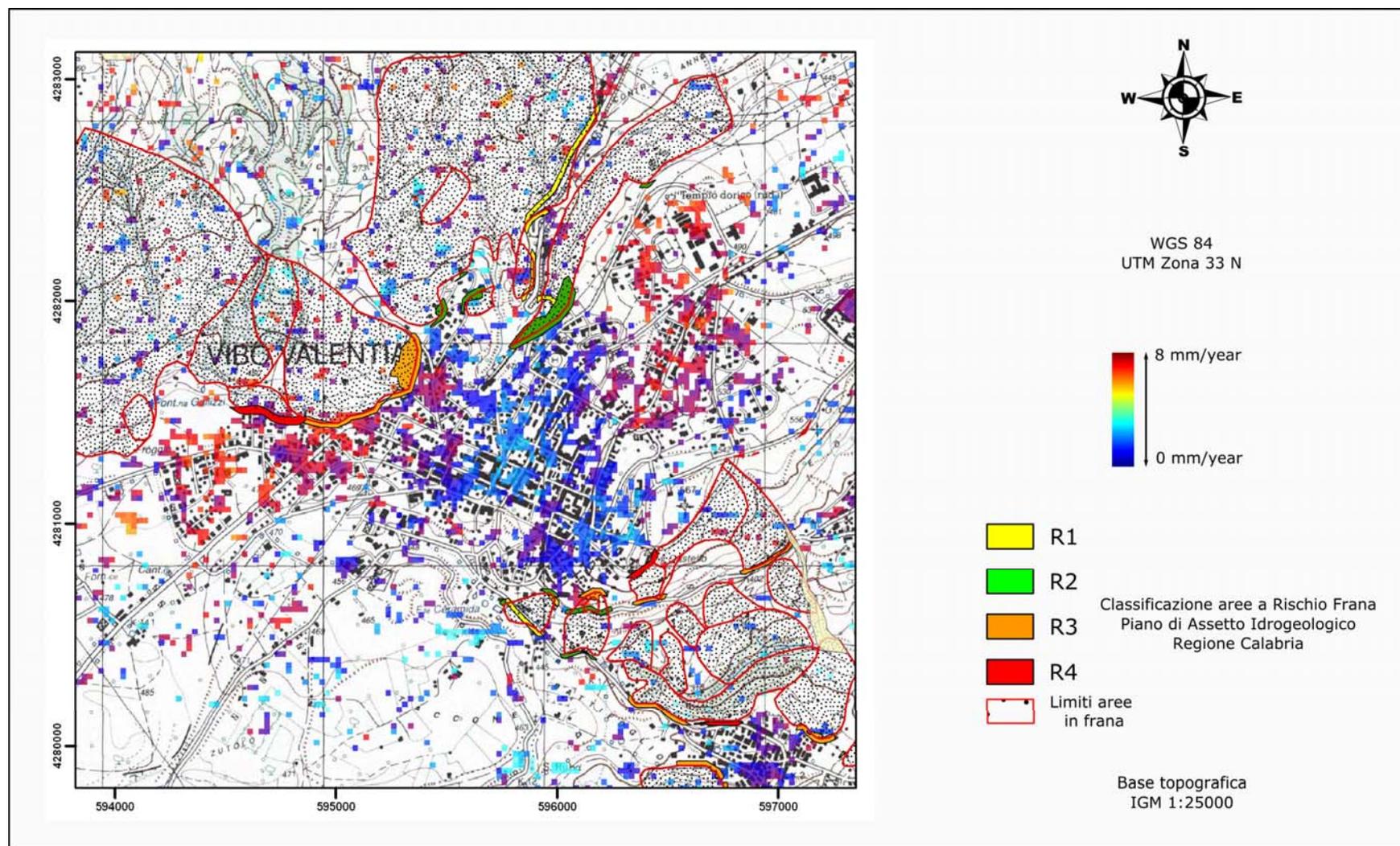


Figura 119. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all'interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931109-19991007).

Sono indicate, in scala di colore, i valori di fase interferometrica assoluta proiettate secondo la linea di massima pendenza del versante. Le aree a più rapida deformazione relativamente ai pendii interessati riguardano principalmente tutta una fascia di territorio, con deformazioni già catalogate e note in bibliografia, a cavallo di viale Affaccio. Inoltre, si può osservare un'altra zona, a N-E dell'abitato e relativa a zone urbanizzate recentemente (es: stadio comunale). Queste ultime informazioni non risultano essere registrate o catalogate in altri studi.

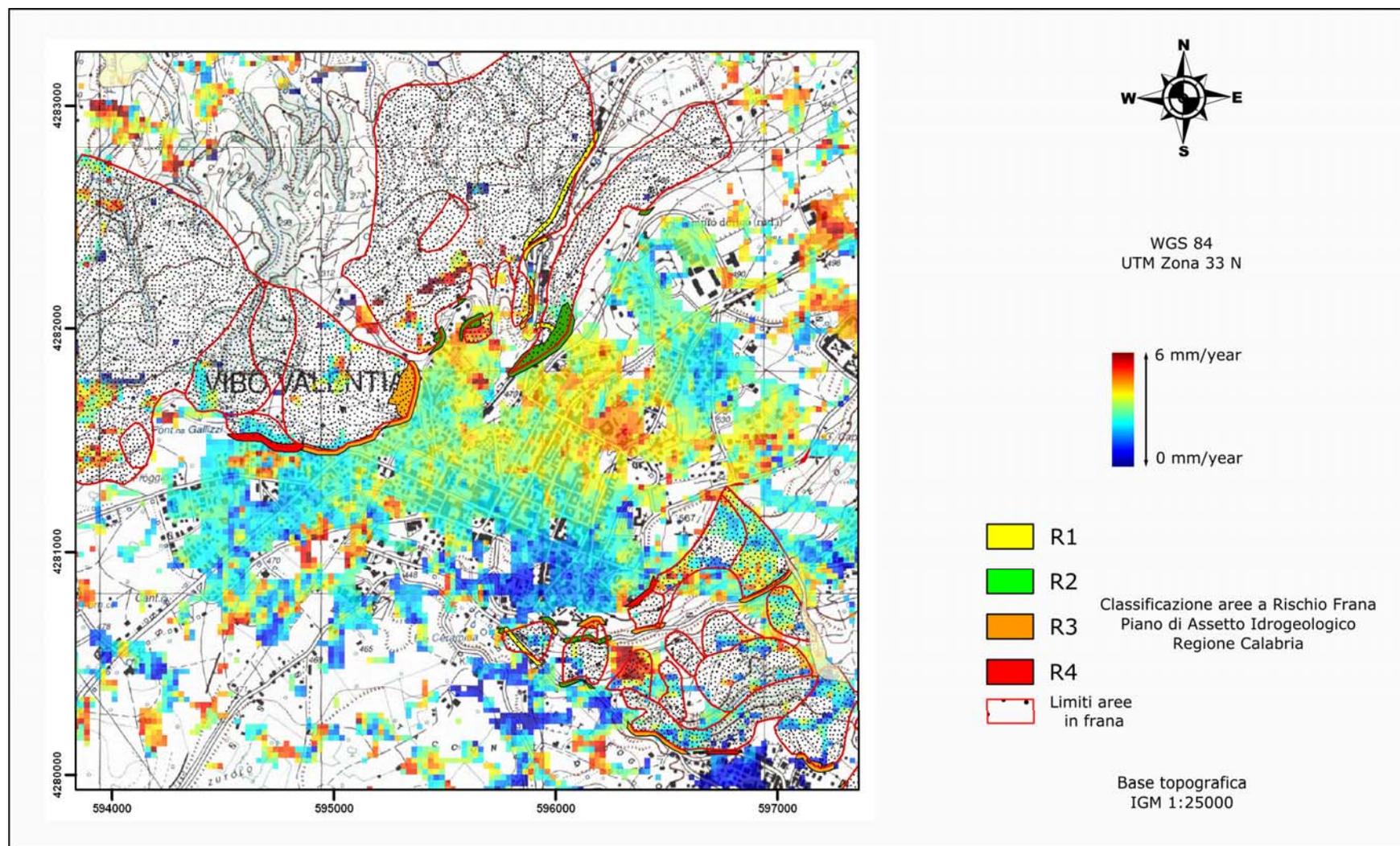


Figura 120. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all'interferogramma filtrato e geocodificato (ENVISAT: 20040409-20050916).

In scala di colore i valori di fase interferometrica assoluta proiettate secondo la linea di massima pendenza del versante. A parte una tendenza generale che sarà meglio affrontata nel seguito del capitolo, possono essere isolate aree a deformazione più puntuale. Queste risultano relative ad una zona a cavallo di via 25 Aprile. Altre aree a deformazione più rapida sono state identificate in differenti interferogrammi immediatamente a monte del torrente St. Anna e relativamente ad un'area da cui probabilmente si sono innescate parte delle colate di fango che hanno provocato i danni della tragica alluvione del 3 Luglio 2006.

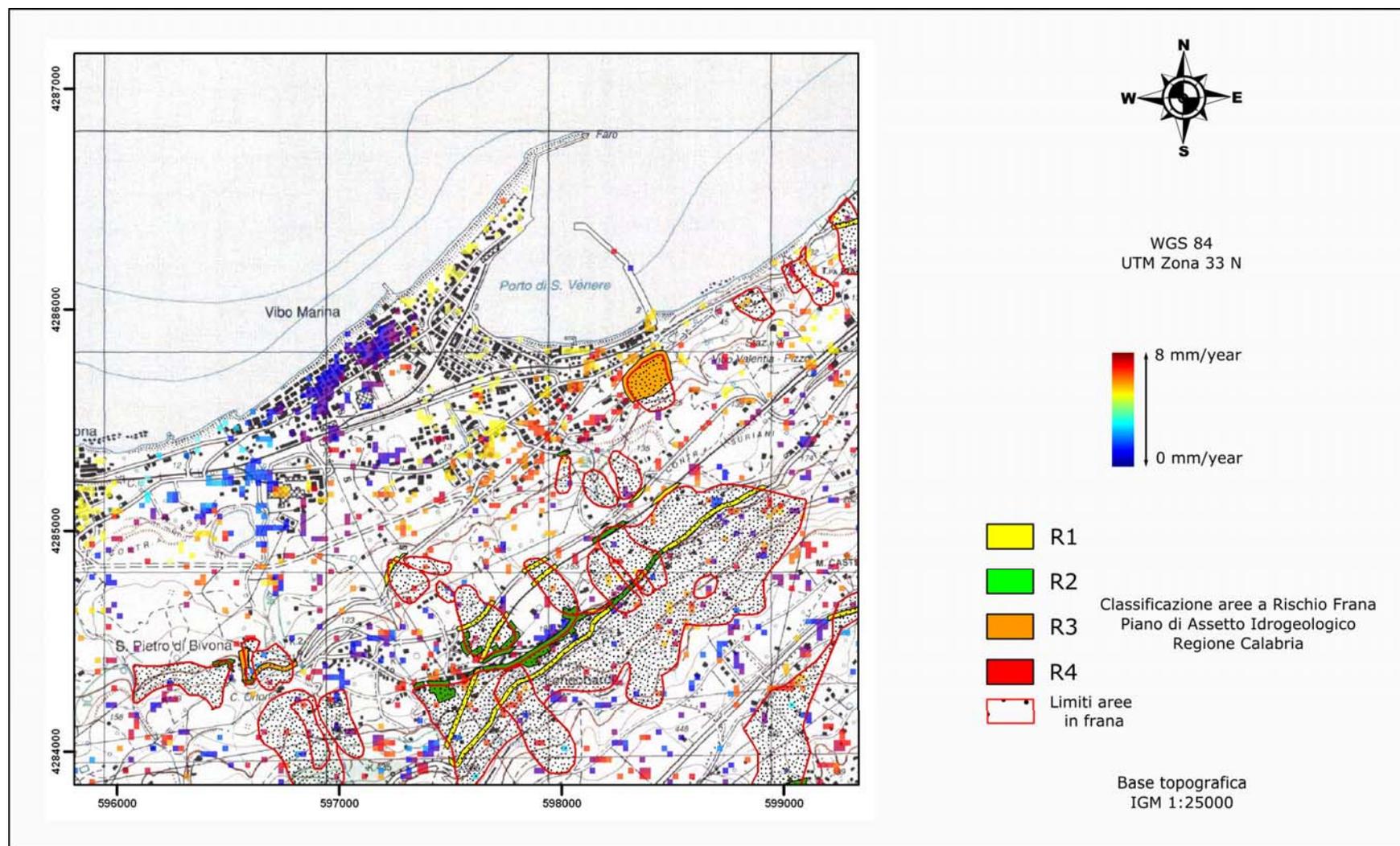


Figura 121. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all'interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931109-19991007).

In scala di colore i valori di fase interferometrica assoluta proiettate lungo la perpendicolare al suolo. Si sono scelti di mostrare due interferogrammi tipo. Possono essere distinte aree in deformazione concernenti aree urbanizzate a ridosso del Porto di San Venere e della ferrovia Tirrena-Inferiore. Pixel relativi a variazioni di fase importanti sono riconoscibili nell'area dello stabilimento Italcementi. Le informazioni deducibili non risultano attualmente riscontrabili in altri studi né essere registrate da lavori tecnici sull'area.

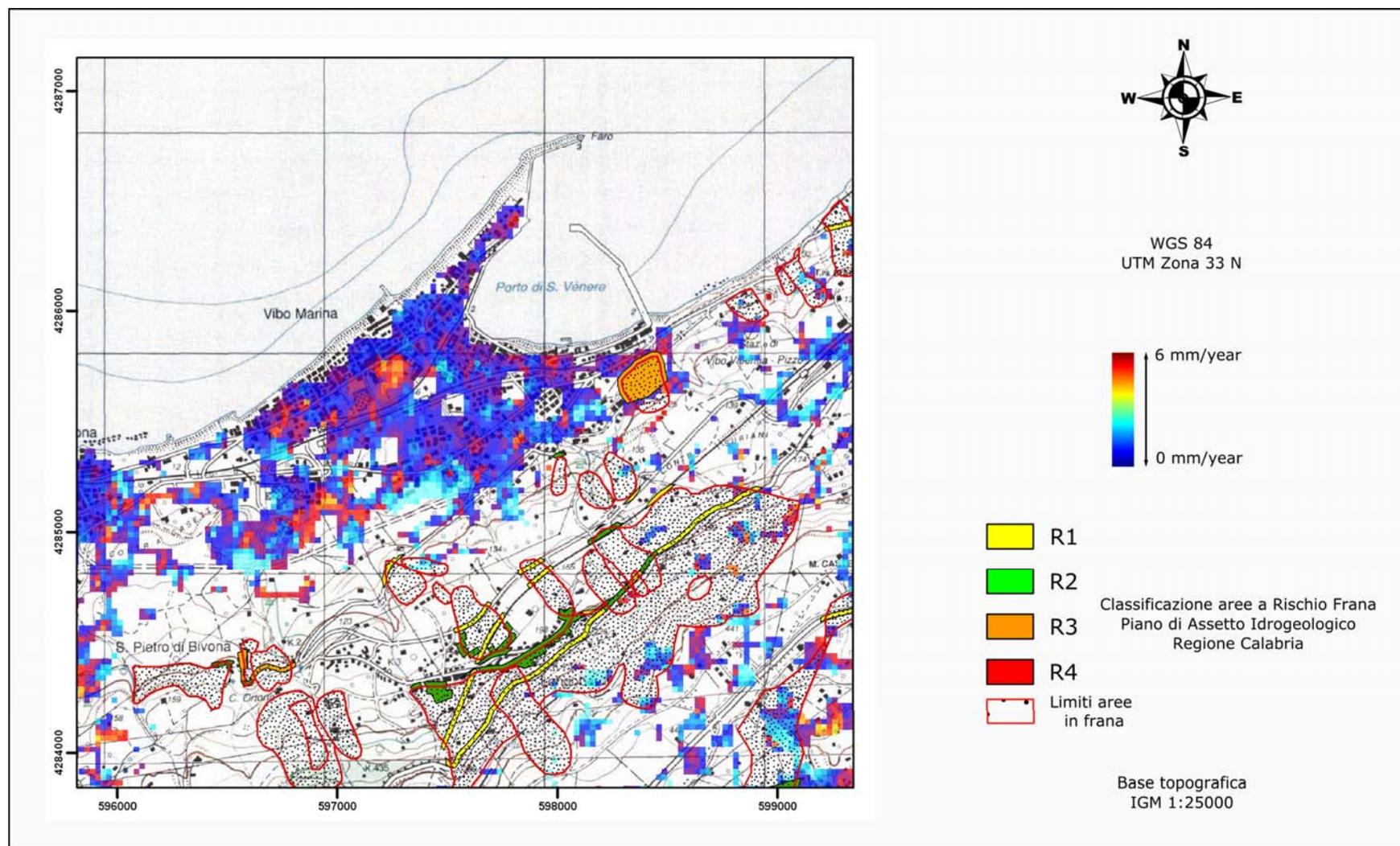


Figura 122. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all'interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931005-19990312).

In scala di colore i valori di fase interferometrica assoluta proiettate lungo la perpendicolare al suolo. Possono essere distinte aree in deformazione concernenti installazioni industriali a ridosso di Viale dell'Industria e ancora nell'area dello stabilimento Italcementi.

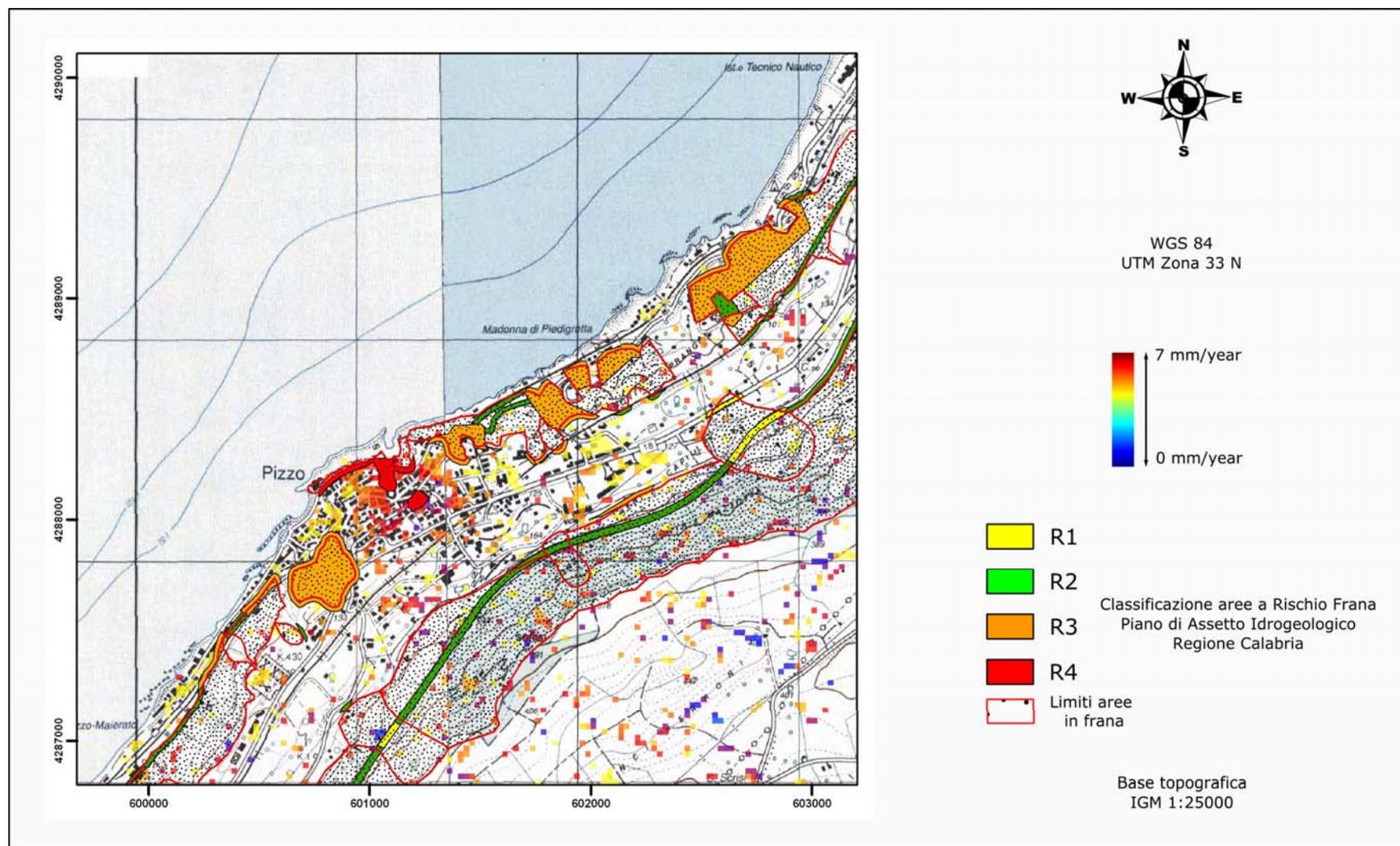


Figura 123. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all'interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931109-19991007).

Sono indicate, in scala di colore, i valori di fase interferometrica assoluta proiettate in questo caso secondo la linea di massima pendenza del versante. È osservabile essenzialmente un'area dell'abitato di Pizzo Calabro già nota in letteratura e oggetto di lavori di mitigazione. Ciò nonostante, l'area identificata sugli interferogrammi sembra interessare una superficie più ampia di quella indicata sulle carte di classificazione PAI. La stessa si colloca immediatamente a valle dei tratti di Strada Statale 18 e di ferrovia che qui si intersecano.

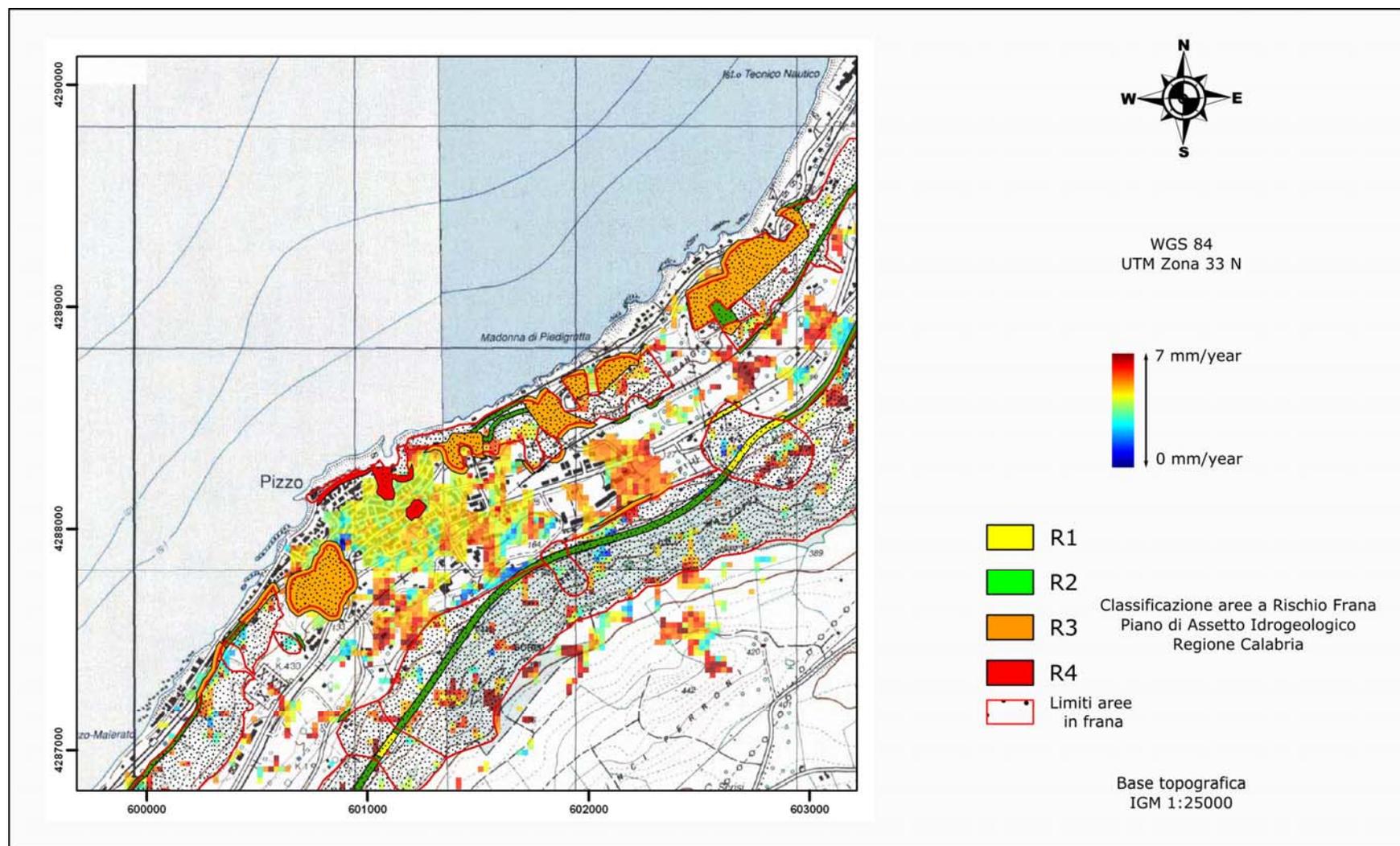


Figura 124. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all'interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931005-19990312).

Sono indicate, in scala di colore, i valori di fase interferometrica assoluta proiettate in questo caso secondo la linea di massima pendenza del versante. Oltre alle osservazioni già fatte in figura 123 possono essere identificate diverse zone di accelerazione delle deformazioni su diversi tratti delle infrastrutture di collegamento presenti sull'area. I punti specifici individuati sembrano non essere attualmente catalogati come punti a rischio molto elevato mentre invece i controlli di campagna testimoniano sulle stesse strutture fenomeni deformativi che arrivano ad interessare talvolta anche strutture di contenimento già realizzate.

6.4 Modelli di deformazione e scenari di rischio per l'area dell'aeroporto di Sant'Eufemia.

All'inizio degli anni '80, presso l'Università della Calabria sono iniziate una serie di ricerche sia sulla sismicità di tipo classico sia più innovative. Nel 1984 sono stati pubblicati i primi risultati (Guerra e Lombardi, 1984), (Figura 125). I primi concernevano lo studio dell'elio quale precursore geochimico dei terremoti e quale mezzo ausiliario nelle indagini di geologia strutturale. Durante le fasi di un evento sismico è nota la mobilitazione di fluidi profondi tra cui l'elio (elio-4), prodotto continuamente nella litosfera per decadimento radioattivo dell'uranio e del torio. Esso fugge verso la superficie attraverso vie preferenziali identificabili con fratture. In letteratura questo gas nobile è stato usato con successo nella prospezione di fratture e faglie sepolte. In Irpinia (provincia di Avellino-Italia) studi sull'anomalia positiva dell'elio hanno per esempio mostrato una buona correlazione con la distribuzione della densità degli epicentri del terremoto del 1980. Come anomalia si intende la differenza di tenore di elio nel suolo e nell'atmosfera che viene assunto come standard di riferimento.

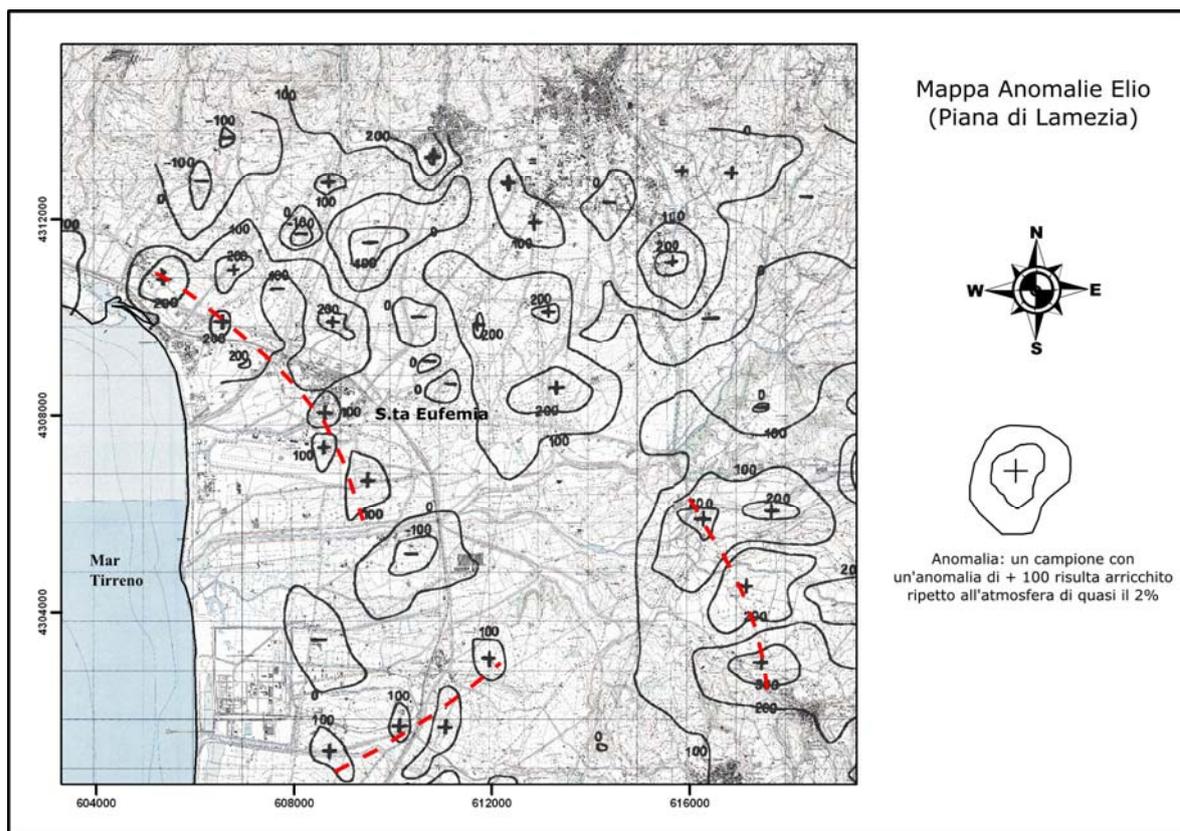


Figura 125. Stralcio della mappa delle anomalie di Elio (1983).

Nello specifico, possono essere localizzati ulteriori allineamenti (in rosso tratteggiato), uno dei quali intercetta la pista dell'Aeroporto di Sant'Eufemia.

I risultati ottenuti con la prospezione areale dell'elio nella Piana di Lamezia, hanno portato alla realizzazione di una carta delle anomalie. In quest'area il prelievo è stato effettuato su di una superficie di circa 300 kmq con una densità di oltre due campioni per kmq. Le conclusioni fatte dai ricercatori all'epoca si erano limitate a evidenziare che alcune delle "maggiori anomalie positive sembravano seguire i bordi della Piana, localizzandosi dove sistemi di fratture mobilizzano i margini della fossa" (Guerra e Lombardi, 1984). Nello stralcio di Figura 125, possono essere individuati altri brevi allineamenti e uno di questi sembra intercettare la pista dell'Aeroporto di Sant'Eufemia.

Nell'ambito degli stessi studi citati (Guerra e Lombardi, 1984), sempre all'inizio degli anni '80, ulteriori investigazioni hanno riguardato analisi di deformazioni del suolo attraverso campagne di misure altimetriche con due linee di livellazione che attraversavano il limite settentrionale della Fossa di Catanzaro nei due versanti: tirrenico (Figura 126) e ionico.

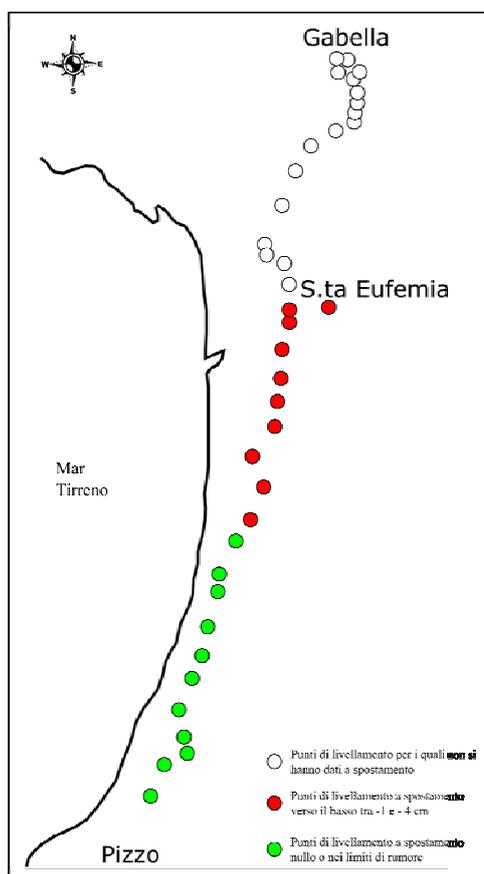


Figura 126. Linea di livellazione sul versante tirrenico.

Essa è costituita da tratti della linea IGMI n. 100, IGMI n. 97 e da un tratto di nuova istituzione che termina in località Gabella. Misure comprese tra il 1966 e il 1983. Sono riportati, in colori differenti, i punti con movimento essenzialmente nullo o nei limiti di errore delle misure (verde), quelli che hanno fatto registrare movimenti significativi e fino ad un massimo di - 4 cm (rosso) e quelli per cui non si ha informazione differenziale perché di nuova istituzione.

Nella primavera del 1983 sono state eseguite le livellazioni geometriche su entrambi i versanti della Fossa di Catanzaro. Le operazioni di livellazione sono state eseguite osservando tutte le norme prescritte per le livellazioni di precisione. Essendo disponibili le quote rilevate dall'IGMI nel 1965 e 1966, è stato possibile calcolare la componente verticale della deformazione del suolo come differenza delle quote dei caposaldi. La Figura 127 riporta il confronto della livellazione del 1983 con quella del 1966 effettuate dall'IGMI da Pizzo a S. Eufemia. Si può evidenziare con chiarezza una definita tendenza degli spostamenti verticali che può fornire utili elementi nelle successive elaborazioni ed interpretazioni.

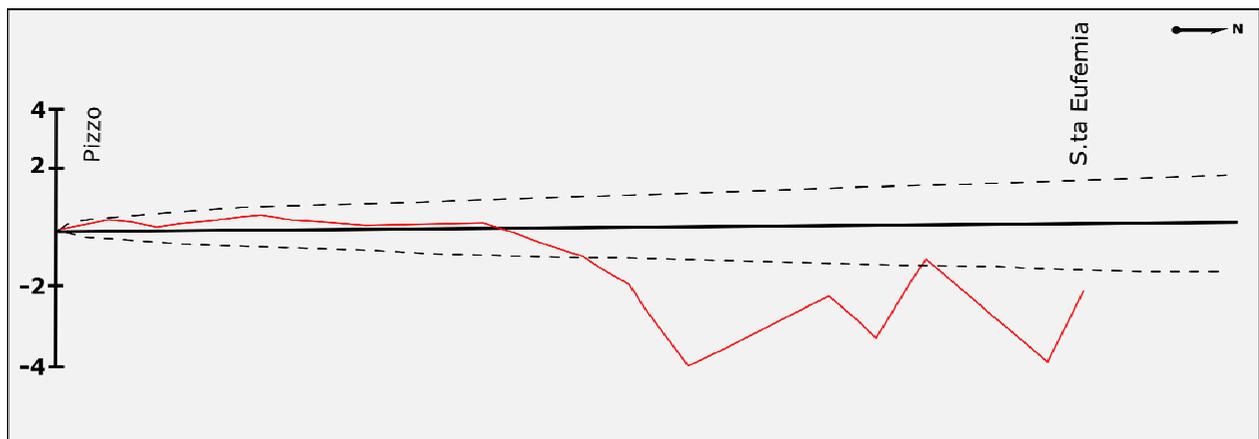


Figura 127. Variazioni tra le livellazioni del 1983 e quelle del 1966 da Pizzo a Sant'Eufemia (IGMI). Si può evidenziare con chiarezza una definita tendenza degli spostamenti verticali. Le linee tratteggiate indicano gli intervalli di confidenza al 95% delle variazioni di quota.

Durante ricerche bibliografiche effettuate all'inizio del lavoro, per gentile concessione di Assomineraria, si sono potuti recuperare dati di prospezione petrolifera (linee sismiche) realizzate dalla *Western Ricerche Geofisiche*, per conto di *Agip Exploration*, alla fine degli anni '70. In particolare, si sono analizzate due linee sismiche (Figura 128). Queste hanno messo in evidenza l'esistenza di sismostrati a differenti profondità compatibili con l'azione di una superficie di discontinuità corrispondente alle ipotesi di modello deformativo che era possibile desumere dall'osservazione dei dati interferometrici. In particolare, l'osservazione di due sismostrati posti a profondità differenti, di cui uno rilevabile alla stessa "profondità sismica" sulle due prospezioni, potrebbe riportare all'effetto di una dislocazione tettonica. Finalmente, si è cercato di effettuare una sintesi dei dati derivati dall'elaborazione interferometrica con questo tipo di osservazioni appena esposte (Figura 129).

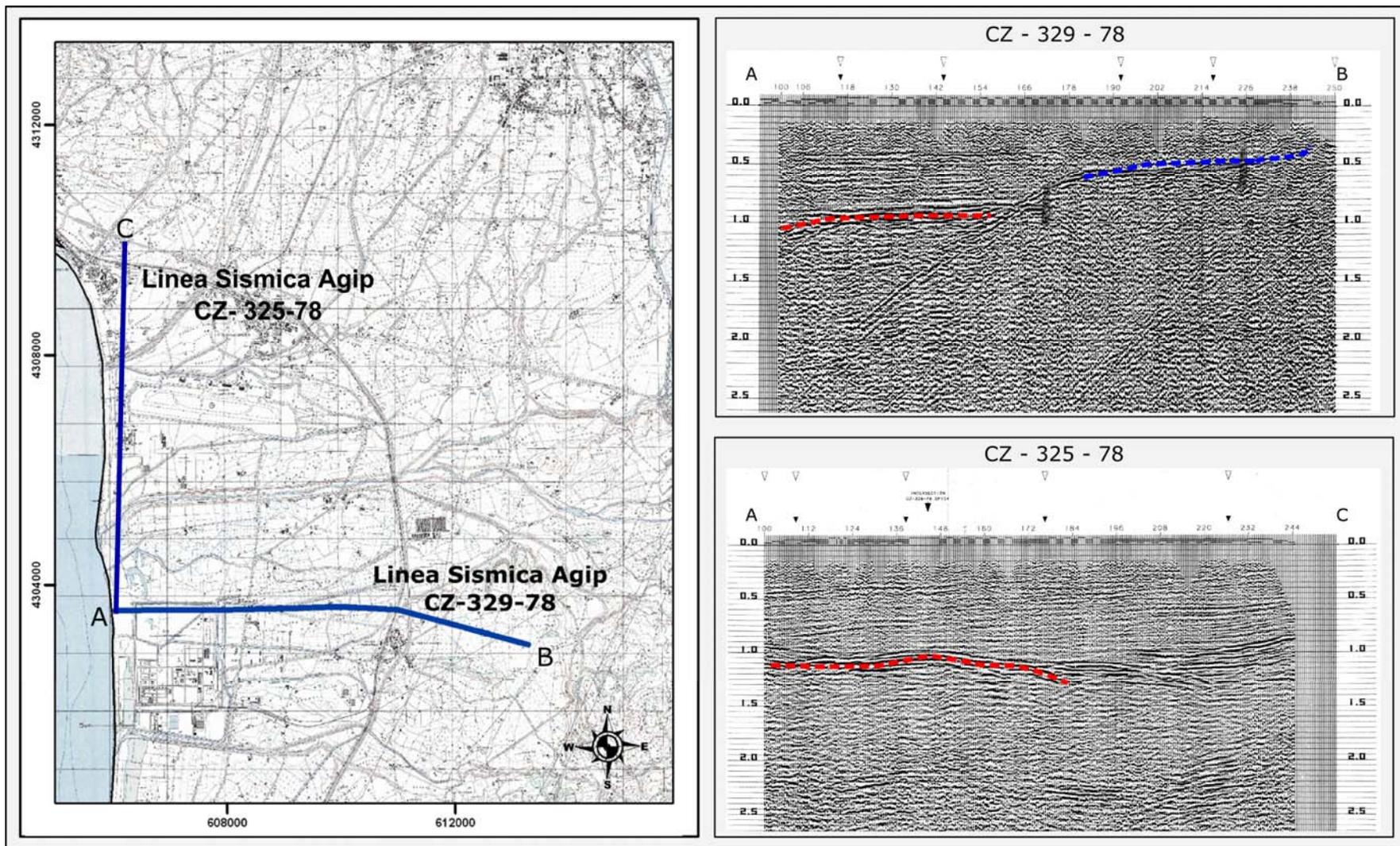


Figura 128. Carta relativa alle linee sismiche sull'area dell'Aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme.

A sinistra, collocazione geografica delle linee sismiche CZ-329-78 e CZ-325-78 realizzate dalla "Western Ricerche Geofisiche" per conto di Agip Exploration nel luglio/agosto del 1978. A destra, profili sismici non migrati relativi alle due prospezioni effettuate. Su entrambe è possibile rilevare la presenza di un sismostrato (in rosso) alla stessa "profondità sismica" (-1 s) che potrebbe corrispondere alla stessa superficie dislocata rispetto al sismostrato (in blu nella CZ-329-78) collocato a quota relativa più elevata (-0.5 s).

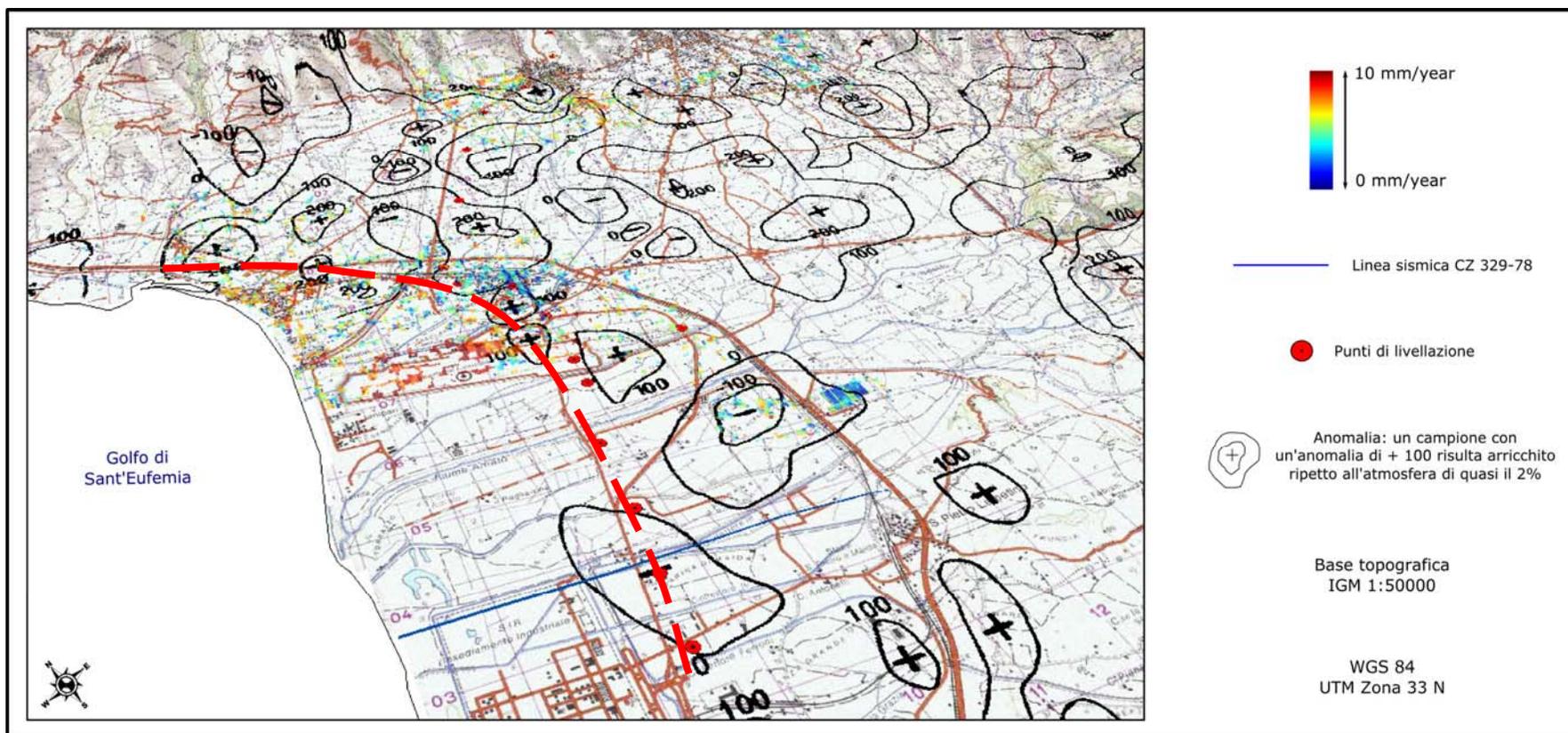


Figura 129. Carta di sintesi delle osservazioni derivate per l'area dell'Aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme.

Sono evidenziati i dati di deformazione derivati dall'analisi SAR interferometrica, la linea sismica CZ-329-78, i punti di livellazione e i dati di anomalia dell'elio. Tutti i dati, allineandosi su una stessa direttrice costituiscono certamente indizi relativi ad una lineazione tettonica oggi non cartografata (in rosso tratteggiato) che potrebbe costituire un elemento di dislocazione trasversale alla "Fossa di Catanzaro". Questa è certamente da tenere in considerazione per studi di geologia strutturale, sismici, ecc. e per la previsione di scenari di rischio in un'area potenzialmente interessata da fenomeni sismici di una certa intensità e dove sono collocati, su uno spazio ristretto, le infrastrutture di comunicazione più importanti dell'intera regione.

Le osservazioni fatte relativamente alla mappatura delle anomalie dell'elio, alle misure di livellazione e alle linee sismiche, seppur le prime due sono relative a studi preliminari non recenti e la terza a prospezioni effettuate con metodi geofisici della fine degli anni '70, danno indicazioni su una tendenza dell'area a fenomeni di subsidenza. I dati derivati dalle misure della fase interferometrica, secondo l'approccio semi-quantitativo avanzato in questa tesi, hanno dato indicazioni in linea con queste permettendo tra l'altro di confinare le deformazioni ad una zona specifica e quindi collocare una potenziale lineazione tettonica secondo una tracciato ben preciso. Si è cercato di sintetizzare le osservazioni fatte attraverso la costruzione di una mappa di sintesi (Figura 129) che permettesse di avere una visione sinottica del quadro prospettato. Si definirebbe in questo modo una sconosciuta linea di dislocazione, trasversale alla "*Fossa di Catanzaro*", certamente da tenere in considerazione per studi di geologia strutturale, sismici, ecc. Particolarmente, visto che parte della stessa intercercetta tutte le linee infrastrutturali di comunicazione della regione (Linea ferroviaria Tirrena-Inferiore, Autostrada A3 SA-RC, Aeroporto Sant'Eufemia), concentrate qui in uno spazio ristretto, questo quadro conoscitivo risulta importante per la previsione di scenari di rischio sia per le infrastrutture a rete che per la popolazione residente. Già le cronache del 1783 illustrano per quest'area importantissimi fenomeni di dissesto. Durante eventi sismici di particolare intensità, anche modesti "scorrimenti" dei terreni sulla potenziale linea individuata produrrebbero effetti drammatici sia relativamente ai danni diretti agli immobili e alle installazioni che alla conseguente azione del mare se si considera la limitata elevazione s.l.m. dell'intera area.

6.5 Modelli di deformazione e scenari di rischio per la città e l'hinterland di Vibo Valentia

Durante l'alluvione del Luglio 2006, la “zona del vibonese”, ha manifestato tutta la sua fragilità e posto l'accento sull'importanza di una più corretta pianificazione territoriale (Par. 3.1; 3.2.2). L'area è localizzata sul versante orientale del massiccio delle Serre, in questa zona costituito prevalentemente da graniti, gneiss, filladi e rocce sedimentarie meso-cenozoiche ed interessato da una serie di faglie che ne determinano l'assetto morfologico. Gli elementi caratterizzanti del paesaggio sono costituiti da colline degradanti verso il mare, terrazzi marini ed incisioni fluviali pronunciate, imputabili in gran parte al sollevamento recente della Calabria. L'evento eccezionale del 3 Luglio 2006 (figura 52, Figura 130) ha determinato l'attivazione di numerosi fenomeni di dissesto sui versanti del settore collinare e montuoso. Questi hanno convogliato ingenti apporti detritici nel reticolo di drenaggio. Le grandi quantità di materiale asportate dalle pendici montane sono state convogliate verso il settore costiero dove hanno determinato la crisi totale del sistema di drenaggio con ampie esondazioni. I fenomeni di dissesto sui versanti hanno interessato in prevalenza la coltre dei terreni di copertura a carattere prevalentemente superficiale. Il substrato roccioso è stato coinvolto solo limitatamente.

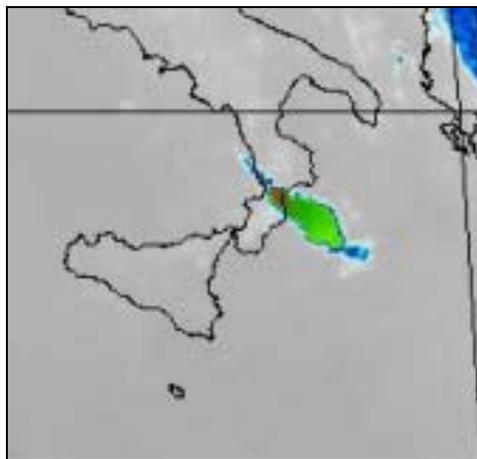


Figura 130. La nube del temporale che ha provocato l'isolata alluvione lampo in Calabria. In arancione la parte più potente del cumulonembo.

Tuttavia, le verifiche di campagna hanno evidenziato casi in cui l'asportazione della coltre superficiale ha messo a nudo settori del substrato roccioso fortemente fratturati e degradati. Questi settori sono stati quindi esposti a fenomeni secondari di crollo di massi che, ancora oggi, interessano differenti tratti della S.S. 18 e della linea ferroviaria. In particolare, gli studi redatti successivamente all'evento (Versace et al., 2006), hanno permesso di isolare aree i cui terreni

sono stati fortemente rimobilizzati durante l'evento meteorico. Questi hanno costituito le ampie colate di fango che hanno investito i nuclei urbani costieri. **In particolare, è stato messo in evidenza che tutti i fenomeni franosi preesistenti a tale evento sono stati da esso rimobilizzati.**

Ciò per testimoniare che il controllo sistematico delle aree interessate da fenomeni franosi in atto e la conoscenza del loro tasso di mobilitazione costituisce un elemento fondamentale per la prevenzione dei fenomeni di rimobilizzazione durante eventi meteorici e/o sismici particolarmente intensi.

L'analisi puntuale dei singoli interferogrammi mette in evidenza l'esistenza di aree a velocità di deformazione maggiore (Figura 112, Figura 119, Figura 120). Queste possono essere individuate essenzialmente su tutto il pendio che nella parte Nord della cittadina vibonese degrada con forti pendenze verso il mare. Tuttavia, possono essere isolate due principali zone relative al versante immediatamente a valle dei quartieri di Viale Affaccio e Cannello Rosso e all'impluvio molto pronunciato costituito dalla parte più a monte del Torrente Sant'Anna, (a Nord dell'Ospedale Iazzolino). Queste aree hanno già conosciuto fenomeni di riattivazione nel recente passato storico (Versace et al., 2006) per cui il controllo del loro tasso di spostamento nonché quello dei massicci rocciosi messi a nudo dalla forte erosione subita, attualmente monitorabile attraverso le tecniche interferometriche, risulta di capitale importanza per la sicurezza delle infrastrutture di collegamento, degli immobili e quindi dei cittadini.

Oltre a ricavare informazioni di tipo puntuale, su aree in cui la mitigazione dei fenomeni in atto dovrebbe essere predisposta rapidamente, pare possibile derivarne altre a scala più ampia. Queste riguardano attualmente deformazioni più lente, che risulterebbero interessare l'intero centro abitato della città di Vibo Valentia. Sia su interferogrammi singoli (Figura 120) che su medie ottenute dalla loro somma (Figura 131 A) sembra che sul territorio siano in atto lenti movimenti differenziali che porterebbero all'isolamento della città in due blocchi disgiunti. Si è voluta fare un'ipotesi interpretativa di quanto osservato supponendo l'esistenza di una "*lineazione tettonica*" (Figura 131 B) che risulterebbe compatibile con il corso del torrente Sant'Anna e risalirebbe nel centro abitato seguendo, probabilmente con strutture accessorie, l'attuale Via Filanda e 25 Aprile. Durante le ricerche eseguite in questo senso, si sono rinvenuti dei documenti redatti durante le prime spedizioni effettuate sul territorio dopo il terremoto del 1783 (Figura 131 C, D, E).

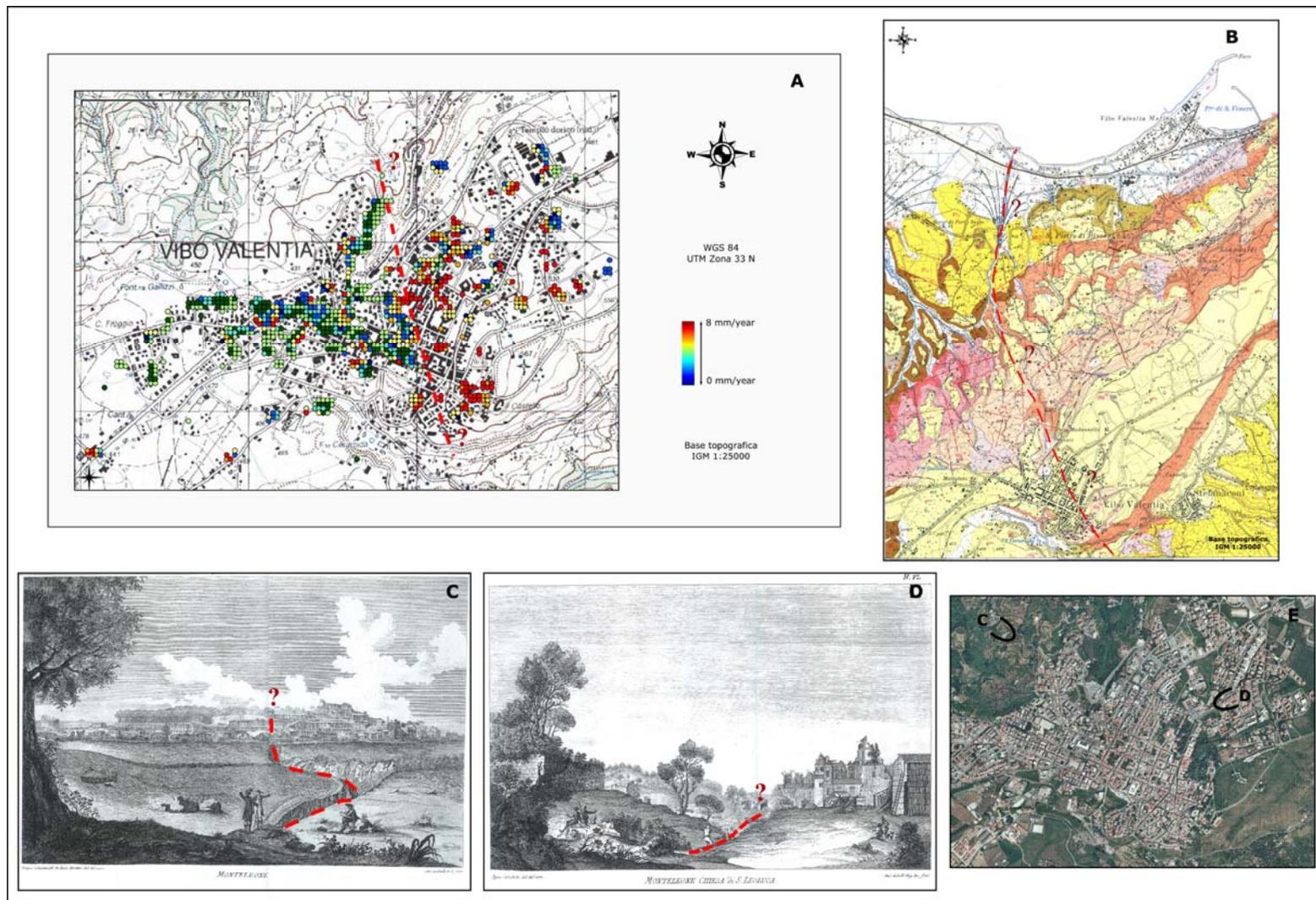


Figura 131. Carta di sintesi delle osservazioni derivate per l'area urbana di Vibo Valentia.

A: dati vettoriali di deformazione– area urbana di Vibo Valentia. Sembra possibile distinguere due “blocchi” in movimento relativo; **B:** dislocazione non attualmente cartografata compatibile con il percorso seguito fino alla costa dal torrente Sant’Anna; **C e D:** Stampe – Post Terremoto 1783 – Monteleone Calabro; **E:** punti di “ripresa” delle Stampe del 1783.

Particolarmente, una stampa riporta i danni del terremoto relativi alla chiesa di San Leoluca (attuale Duomo) ed alla piazza antistante mentre un'altra i danni generali alla città visti da una collina a valle della stessa. Su tutti e due le stampe sembra possibile riconoscere un vallone pressoché compatibile con il corso del Torrente Sant'Anna. Quest'ultimo poteva costituire parte dell'attuale via 25 Aprile e Via Filanda. In ogni caso, nella stampa di Figura 131 D si può notare, sul lato Sud-Ovest dell'attuale *Valentianum*, l'esistenza di una incisione che poteva costituire un elemento di "richiamo gravitativo" per i fabbricati a ridosso dello stesso. Di conseguenza, questa parte del settore di studio è stata oggetto di rilievi speditivi per cercare di approntare una cartografia dello stato degli immobili relativamente al loro quadro fessurativo (Figura 132). Tuttavia, bisogna considerare che non tutte le deformazioni che interessano un edificio sono dovute esclusivamente a sollecitazioni esterne. Così, conviene dissociare le deformazioni di superficiali legati al deterioramento delle strutture da deformazioni di altro tipo. Rimane indubbio che quando in una zona si ritrovano differenti immobili nelle stesse condizioni di danneggiamento si possono supporre verosimili possibili problematiche legate a deformazioni della superficie terrestre. Dunque la densità dei fabbricati deformati è sempre rivelatrice della presenza o assenza di deformazioni di un settore. In questo modo si può cercare di apportare elementi che materializzino le deformazioni della zona di studio.



Figura 132. Particolari dello stato fessurativo degli immobili collocati a ridosso di Via 25 Aprile.

Anche se non possono esserne determinate con certezza le cause, si tratta di costatazioni validanti sul campo l'esistenza di variazioni topografiche e deformazioni associate. I rilievi hanno riguardato fondamentalmente gli edifici a ridosso di via 25 aprile. Si è potuto constatare che, a parte alcuni edifici recentemente rinnovati proprio a causa di fenomeni deformativi, la maggior parte degli immobili che si affacciano alla suddetta strada presentano fessurazioni (Figura 132) che confermano come la strada in questione sia stata realizzata colmando un vecchio impluvio il quale oggigiorno costituisce un elemento di richiamo per i settori della città interessati. Attualmente non sono stati eseguiti ulteriori rilievi speditivi che possano confermare l'origine tettonica dell'elemento rilevato. Le osservazioni relative a questa ipotesi derivano solo dalle osservazioni di velocità di deformazione differenziali desunte dall'analisi interferometrica differenziale.

Per quello che riguarda possibili scenari di rischio derivabili dalle informazioni desunte dall'analisi delle immagini SAR disponibili su un arco temporale di circa 12 anni, appare non sottovalutabile l'esistenza di punti a maggiore velocità di deformazione. Per gli stessi l'analisi ha messo in evidenza l'assoluta necessità di prevedere interventi di mitigazione per non pregiudicare definitivamente la possibilità di recupero. Inoltre, la tecnica potrebbe permettere il

monitoraggio di tutte quelle aree che la forte erosione verificatasi durante l'evento alluvionale del luglio 2003 ha privato nella coltre superficiale e che oggi minacciano per esempio con crolli diffusi differenti vie di comunicazione. Relativamente ai potenziali movimenti differenziali della città, un'accelerazione degli stessi lungo il “*binario*” individuato in occasione di eventi sismici di una certa intensità potrebbe arrecare seri danni nei settori della città coinvolti.

Capitolo 7. Conclusioni

Come ampiamente illustrato e discusso in precedenza, l'interferometria radar differenziale (DInSAR) è una tecnica di telerilevamento attivo le cui potenzialità, in materia di identificazione, localizzazione, caratterizzazione e quantificazione delle fenomenologie di deformazione del suolo, sono state ampiamente dimostrate in qualche migliaio lavori di ricerca, dalla fine degli anni '80 ad oggi. La tecnica ha una valenza multi-temporale particolarmente significativa nella sua applicazione satellitare, in particolare da piattaforme operanti ad angoli di illuminazione fissa..

Malgrado la Calabria sia caratterizzata da eccezionali condizioni di instabilità di versante o del suolo - unica regione italiana a presentare almeno una frana in ciascuno dei suoi 409 Comuni, - l'approccio interferometrico è stato utilizzato (i) poco frequentemente, (ii) limitatamente a casi di studio (frana di Acri, *Caracciolo et Al., 2005* o subsidenza in area Belvedere di Spinello, *Fortunato et Al. 2008*) o casi di dissesto eccezionali – quali la frana di Cavallerizzo (Colombo, 2007) o la possibile subsidenza estrattiva offshore del Crotonese (Ferretti et al. 2006).

In sostanza, questo studio è stato originato dall'esigenza di affrontare l'analisi sistematica ed il monitoraggio dei suoli e delle infrastrutture, a scala *supra*-comunale e con frequenze di *refresh* strategiche

Le caratteristiche del territorio di studio come il forte rilievo, la copertura vegetale ed il clima, sono altrettanti elementi sfavorevoli all'utilizzo della tecnica interferometrica, specialmente in modalità di analisi multitemporale. Si è dunque deciso di focalizzare l'attenzione sulle fenomenologie e sui luoghi che presentassero il maggior vantaggio in termini di importanza del dato e di minimizzazione degli inconvenienti di misura. Fattore definitivo di importanza nella scelta dei siti di analisi e delle fenomenologie di dissesto da seguire, è stata la disponibilità di adeguate informazioni quantitative indipendenti, provenienti da rilievi geofisici, topografici, cartografici, geologici e geodetici.

Nel lavoro di ricerca sono state utilizzate - su 50 scene complessive acquisite dai satelliti ERS-1, ERS-2 ed ENVISAT - tre diverse tecniche interferometriche Radar:

(a) InSAR, per la generazione di Modelli Digitali di Elevazione (DEM) o più propriamente – in considerazione di una dimensione fra 400 e 900 m² dei pixels ricampionati – di Modelli Digitali di Superficie (DSM);

(b) DInSAR per la generazione di mappe di deformazione del suolo su base differenziale, e

(c) ILU, per classificazione d'uso del suolo su base interferometrica semplice.

La zona di interesse – costituita dalle aree urbane e peri-urbane delle città di Lamezia Terme (75'000 abitanti) e Vibo Valentia (50'000 abitanti, capoluogo di provincia), con le reti infrastrutturali di strade, ferrovie e aeroporto che le connettono – è posta su un crocevia strategico per la Calabria, purtroppo oggetto di uno sviluppo urbano intenso e fortemente disorganizzato. Tutte le aree scelte caratterizzate da agglomerati urbani di modesta estensione, con passaggi a terreni ben vegetati senza transizione peri-urbana, inquadrata in situazioni di forte tettonica attiva che danno luogo a fenomeni accelerati di subsidenza e di smantellamento dei versanti, con puntuali inneschi di fenomeni gravitativi.

Il metodo interferometrico - qui utilizzato su serie di coppie di immagini - permette l'effettuazione di studi sinottici su aree di migliaia di chilometri quadrati (nel nostro caso circa 3'500), fornendo precisioni teoricamente migliori del centimetro sulle misure di deformazione scomposte lungo la linea di vista (LOS).

Essendo basata su quantità anche molto esigue di immagini, la tecnica presenta globalmente costi minori rispetto ai metodi di monitoraggio tradizionali e non necessiterebbe di strumentazioni al suolo. Tuttavia essa soffre di una debolezza strutturale conosciuta: la vulnerabilità alle eterogeneità parametriche sia in trasmissione (variabilità laterale e temporale di fase nel modello troposferico reale) sia in riflessione (debole coerenza multitemporale quando i tassi di rivisitazione sono di 35 giorni come per ERS ed ENVISAT in modalità ERS-like).

Di seguito si riassumono i principali risultati ottenuti nello studio effettuato in Calabria centrale facendo preliminarmente un'analisi delle conclusioni metodologiche, analizzando poi l'efficacia dell'applicazione nell'area oggetto dell'analisi e presentandone infine i possibili sviluppi futuri.

7.1 Conclusioni metodologiche

Abbiamo anticipato che la tecnica DInSAR si è rivelata efficace nell'analisi quantitativa di differenti problematiche tipiche dell'area di studio, permettendo di confermare l'esistenza di movimenti in atto qualitativamente noti e di porre interrogativi su nuovi fenomeni ad oggi

sconosciuti. Si è comunque visto che i risultati sono stati confermati in tutte le analisi di “verità al suolo” condotte sia in forma di ricognizione visiva o documentale (storica), sia come re-interpretazione di dati geofisici pre-esistenti.

Tenuto conto delle limitazioni strutturali conosciute dell’interferometria operata su coppie di dati, di cui si è detto in precedenza, l’integrazione del software SHISSOR nell’ambiente di processo Radar SARscape™ ha fornito eccellenti risultati. Infatti SARscape - all’interno del quale sono implementati numerosi *tools* che permettono di generare prodotti completi - è un “*enabler*” soddisfacentemente completo per un’analisi interferometriche classiche (nella configurazione utilizzata) che non sfruttino a ridondanza le proprietà pseudo-invarianti dei cosiddetti “scatteratori persistenti” in senso lato. In particolare, due recenti aggiornamenti del prodotto industriale hanno consentito di migliorare significativamente la produttività e di moltiplicare il numero di casi di studio, permettendo quindi di rendere più completa l’analisi. Il primo di tali aggiornamenti, permette di fornire punti di controllo a terra a deformazione nulla o nota da utilizzare nella rimozione dell’offset di fase: esso agevola significativamente la mappatura di piccole deformazioni differenziali rapide in piccole aree, generalmente responsabili del danno a infrastrutture e sottoservizi basati su condutture rigide. Il secondo consente la trasformazione delle misure riferite alla direttrice satellite-bersaglio (LOS) nelle componenti del moto reale attraverso la proiezione del vettore movimento sia verticalmente che lungo la linea di massima pendenza del versante rendendo i dati ottenuti meglio confrontabili con i dati di monitoraggio convenzionale.

Un ruolo di particolare importanza nell’implementazione della robustezza dell’analisi è stato rivestito dalla procedura (software) SHISSOR, sperimentata inizialmente su aree classiche a deformazione nota (ad es. sulle deformazioni post-lavori di consolidamento nella Gare Saint Lazare di Parigi). Come in precedenza illustrato, SHISSOR ha efficacemente consentito di contenere/ridurre l’influenza dell’eterogeneità multitemporale del modello troposferico reale, permettendo un significativo incremento numerico dello sfruttamento delle immagini SAR e ASAR, ivi incluso lo studio di deformazioni su periodi in cui non è disponibile alcuna coppia di immagini radar non perturbate. In particolare resta da definire una regola operativa soddisfacente per le finestre di scanning da utilizzare per ottimizzare in maniera robusta la separazione del moto dal rumore.

A fronte del giudizio complessivamente positivo, si noterà comunque che SHISSOR non è stato concepito per trattare contemporaneamente multipletti di acquisizioni SAR: ciò può essere considerato come un utile miglioramento da apportare in futuro al programma.

Infine l'utilizzo di un primo approccio qualitativo finalizzato all'individuazione delle aree in deformazione relativa ed al loro confronto con quelle catalogate con altri metodi e il successivo approccio quantitativo che ha fornito dati assoluti di spostamento lungo la verticale (subsidenze) o lungo pendii (frane) hanno permesso la redazione di mappe sinottiche originali e di derivare informazioni inedite sulle aree campione.

Non considerando le problematiche intrinseche alle immagini (per esempio i dati ERS-2 acquisiti in modalità "gyroless" dopo il 1999, risultano spesso male o non analizzabili), si considererà che i limiti della tecnica differenziale semplice sono sicuramente associati alla decorrelazione temporale. Come previsto, infatti, molti interferogrammi presentano zone coerenti di estensione troppo limitata per permettere la lettura correlata di frange interferometriche, portando a operazioni di "srotolamento di fase" (*phase unwrapping*) difficoltose: solo nelle zone più urbanizzate è stato possibile finalizzare le osservazioni sino alla stesura di mappe di deformazione. Le caratteristiche sinottiche e multitemporali di dati e risultati sono state rese fruibili grazie alla sistematica integrazione in un GIS che ne ha consentito l'analisi congiuntamente ad altre famiglie di dati sinottici e puntuali. Per lo studio si è utilizzato ArcGIS di ESRI.

7.2 Conclusioni tematiche

L'analisi DInSAR, la tecnica portante del progetto, ha permesso di filtrare inizialmente su larga scala le possibili sedi di eventi di subsidenza o generalmente di deformazione. Le analisi condotte successivamente nei siti individuati ha portato alla produzione di mappe in cui la distribuzione dei dati di variazione altimetrica è rappresentata per ogni pixel ed espressi in mm/anno – come canonicamente effettuato nella maggior parte dei casi di letteratura. Come accennato, a sapere di chi scrive non esistono per l'area osservata adeguati studi di monitoraggio altimetrico (a mezzo GPS o livellazione di precisione, per esempio) condotti con frequenze di ripetizione idonee alla documentazione dell'insorgere e dell'evoluzione dei fenomeni di dissesto

e subsidenza. Quindi, attualmente, non risulta possibile confrontare i dati ottenuti per verificarne l'effettiva bontà.

Verifiche semi-qualitative confermano agevolmente le indicazioni ottenute sull'area dell'aeroporto di Sant'Eufemia-Lamezia Terme, dove sono modellate da satellite e parzialmente osservate al suolo deformazioni che investono differenti bersagli, tra la pista principale, la torre di controllo e la parte ovest dell'apron principale. Numerosi dati telerilevati, terrestri e visuali convergono sulla stessa conclusione ponendo anche qualche interrogativo relativamente alla sicurezza delle infrastrutture concentrate nell'area in questione. Più in generale per quest'area, i dati puntuali di spostamento, analizzati sinotticamente attraverso sistemi GIS, hanno portato all'individuazione di potenziali strutture lineari. Queste hanno certamente costituito binari di dislocazione che rimobilizzandosi durante i numerosissimi terremoti che hanno colpito l'area hanno fatto registrare per la stessa danni ingentissimi. Considerando che la pianificazione territoriale ha previsto proprio per quest'area la concentrazione di tutte le infrastrutture regionali di comunicazione queste considerazioni risultano di fondamentale importanza per la previsione di scenari di rischio sia per le infrastrutture a rete che per la popolazione residente. Infatti, durante eventi sismici di particolare intensità, anche modesti "scorrimenti" dei terreni sulla potenziale linea individuata produrrebbero effetti drammatici sia relativamente ai danni diretti agli immobili e alle installazioni che per la conseguente azione del mare. I dati raccolti per quest'area non risultano catalogati né dagli enti di controllo del territorio né da studi precedenti e risultano pertanto inediti.

Per la stessa area le deformazioni osservate sui pendii in prossimità degli alvei dei torrenti Bagni e Cantagalli (area urbana di San Biase e Nicastro) possono essere confermati dagli stati fessurativi rilevabili e desumibili, qualitativamente, da lavori che hanno riguardato la redazione di tesi di laurea (Gaccione e Iencarelli, 2001). I fenomeni qui risultano conosciuti e qualitativamente confermati ma non monitorati.

Anche per l'area vibonese i fenomeni rilevati sono numerosi. Per Vibo Marina, le problematiche principali responsabili delle deformazioni misurate sono ascrivibili al consolidamento di depositi alluvionali conseguenti alla realizzazione dell'area industriale ed all'emungimento della falda (area stabilimento Italcementi). I fenomeni dovrebbero essere tenuti sotto controllo vista l'estrema vulnerabilità del territorio in occasione di eventi meteorici di media ed elevata intensità (ad es. nel caso dell'alluvione del 3 Luglio 2006).

Nella città di Vibo Valentia le osservazioni fatte sono state essenzialmente di due tipi: la prima concerne fenomeni di deformazione puntuale osservati in città nelle zone Affaccio, Canello Rosso e nella parte superiore del Torrente Sant'Anna. Su questi siti specifici si sono osservate velocità di deformazione largamente eccedenti quelle dei terreni adiacenti. Nelle zone citate, i fenomeni di dissesto sono conosciuti ma, vista la loro rimobilizzazione durante l'evento alluvionale 3 Luglio 2006, la conoscenza della derivata risulta di fondamentale importanza sia per le infrastrutture a rete sia per la popolazione residente.

La seconda osservazione è relativa invece a possibili movimenti differenziali di due blocchi della città su un "binario tettonico" che in stampe storiche sembrava più facilmente osservabile e che oggi l'urbanizzazione ha inglobato e nascosto. Questa seconda osservazione di carattere più regionale pone nuovi quesiti relativamente alla risposta dei suoli a probabili fenomeni sismici di forte intensità ed alla collocazione di snodi infrastrutturali da utilizzare in situazioni di crisi.

Per la cittadina di Pizzo Calabro l'analisi interferometrica differenziale ha svelato deformazioni puntuali che dovrebbero tenere sotto controllo effettuando interventi di mitigazione del rischio da instabilità di pendio (considerando l'assetto geologico-strutturale, le caratteristiche morfologiche dell'area e la condizione strutturale degli edifici). Tutti i risultati ottenuti sono ritenuti importanti ed utili per l'interpretazione geotecnica e geostatica dell'area.

Infine lo studio ha portato anche a produrre tematismi quantitativi (DSM e mappe di deformazione) e qualitativi (mappe ILU di classificazione del territorio) dimostrando la grande versatilità dei dati SAR che consentono la produzione di differenti prodotti a partire da un unico dato multidimensionale.

7.3 Sviluppi futuri

Non considerando – per ragioni di economia, di semplicità e di diffusione d'uso – il ricorso alle tecniche di analisi basate su procedure di *stack* verticale massicciamente multi-immagine finalizzate alla definizione di layers di scatteratori "permanenti" (PS-InSARTM) o "persistenti" (secondo la nomenclatura corrente non associata a brevetti d'invenzione nel campo), gli ulteriori sviluppi delle tecniche qui espone e utilizzate passeranno ragionevolmente attraverso attività centrate sul processo di ottimizzazione includendo:

PS-InSARTM è un marchio depositato del Politecnico di Milano

- (i) Il miglioramento dell'osservazioni attraverso l'analisi e rimozione sistematica dell'eterogeneità laterale di fase associabile al contributo troposferico efficace;
- (ii) la realizzazione di controlli sistematici di verifica a terra mediante confronto diretto con la cartografia dei fenomeni franosi (esistente e da aggiornare regolarmente) e, soprattutto, la costruzione di un inventario delle lesioni degli edifici da associare temporalmente e spazialmente agli eventi di deformazione pseudo-verticale.

BIBLIOGRAFIA

Articoli

- Adam N.; Kampes B.; Eineder M., (2004). Development of a Scientific Permanent Scatterer System: Modifications for Mixed ERS/ENVISAT Time Series. *Proceedings, Envisat Symposium 2004, Salzburg, September 6-10, 2004, on CD-ROM.*
- Allen C. T., (1995). Interferometric synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter, 1995, pp. 6-13.*
- Allievi J., Ambrosi C., Ceriani M., Colesanti C., Crosta G., Ferretti A., Fossati D., Laffi R., (2002). Nuove strategie integrate per il monitoraggio di aree soggette a deformazione superficiale e/o profonda. *Atti della 6^a Conferenza Nazionale ASITA – Perugia 5/8 Novembre 2002, 6 p, on CD-ROM.*
- Allievi J., Cespa S., Colesanti C., Ferretti A., Locatelli R., Prati C., (2002). Monitoraggio di instabilità di versante a partire da serie di dati SAR elaborati con la tecnica dei diffusori permanenti. *Atti della 6^a Conferenza Nazionale ASITA – Perugia 5/8 Novembre 2002, 6 p, on CD-ROM.*
- Ammendola P., Candela L., Milillo G., Rum G., (2001). I DEM per la cartografia provenienti da un sistema SAR in configurazione interferometrica: la missione italo-tedesca-americana SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). *Atti della terza conferenza di MondoGIS – Roma 23/25 Maggio 2001, pp. 27-34.*
- Amodio Morelli L., Bonardi G., Colonna V., Dietrich D., Giunta G., Ippolito F., Liguori V., Lorenzoni S., Paglionico A., Perrone V., Piccarella G., Russo M., Scondone P., Zanettin E., Zuppetta A., (1976) L'Arco Calabro-Peloritano nell'orogene appennino-maghrebide. *Mem. Soc. Geol. It., 17, pp. 1- 60.*
- Angiulli G., Barrile V., Versaci., (2003). Un sistema a basso costo per l'analisi de dati SAR. *Atti della 7^a Conferenza Nazionale ASITA – Verona 28/31 Ottobre 2003, 6 p, on CD-ROM.*
- Askne J., Hagberg J. O., (1993). Potential of Interferometric SAR for Classification of Land Surfaces. *Proceedings of IGARSS'93, pp. 985-987.*
- Bamler R., Eineder M., Kampes B., Runge H., Adam N., (2003). SRTM and beyond: current situation and new developments in spaceborn InSAR. *ISPRS Hannover Workshop – Higt Resolution Mapping from Space – 2003, 7 p.*
- Bamler, R. et P. Hartl (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems 14(4): pp. 1-54.*
- Bamler R., (1992). A comparison of range – Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 30, publication 4, (1992), pp 706-713.*
- Baran I., Stewart M.P., (2003). Small scale surface deformation monitoring in mining regions using differential radar interferometry. *Proceeding, 11th FIG Symposium on Deformation Measurement – Santorini – Greece – 2003, 8 p.*

- Barber B. C., (1985) Theory of digital imaging from orbital synthetic aperture radar, *International Journal of Remote Sensing*, volume 6, publication 7, (1985), pp 1009-1057.
- Barrile V., Giacobbe L., (2001). Tecniche di filtraggio e classificazione di immagini SAR. *Atti della 5^a Conferenza Nazionale ASITA – Rimini 9/12 Ottobre 2001*, 6 p, on CD-ROM.
- Bellecci C., Casella L., Colacino M., Federico S. Il clima della Calabria. Andamenti termopluviometrici e analisi dei trend in zone climaticamente e morfologicamente omogenee. *Aracne Editrice*, 2003, 124 pp.
- Bignami C., Chini M., Pierdicca N., Stramondo S., (2004). Stima del danneggiamento da terremoto in area urbana attraverso l'uso di dati ASAR. *Atti della 8^a Conferenza Nazionale ASITA – Roma 14/17 Dicembre 2004*, 6 pp, on CD-ROM.
- Bo G, Garzarelli Doria S., Renzi L., Rossi F., Ramella A., Berardi R., Passalacqua R., (2001). Uso dell'interferometria differenziale per analisi di movimenti lenti del terreno. *Atti della 5^a Conferenza Nazionale ASITA – Rimini 9/12 Ottobre 2001*, 6 pp, on CD-ROM.
- Borgeaud M., Wegmuller U., (1996). On the Use of ERS SAR Interferometry for the Retrieval of Geo and Bio-Physical Information. *Proceedings of the “Fringe 96” Workshop on ERS SAR Interferometry, Zurich, Switzerland, 1996, ESA SP-406, 1997, pp 83-94.*
- Brown W. M., Porcello L. J., (1969). An introduction to synthetic aperture radar. *IEEE Spectrum*, 1969, pp. 52-62,.
- Burton A. N., (1971). Relazione generale, Carta Geologica della Calabria. *Cassa per il Mezzogiorno, Roma, 120 pp.*
- Cafforito C., Prati C., Rocca F., (1991). Full resolution focusing of Seasat SAR images in the frequency – wave number domain., *International Journal of Remote Sensing*, volume 12, publication 3, pp 491-510.
- Caracciolo T., La Pietre T., Pellegrino A., (2005). Primi risultati del confronto tra tecniche georforologiche convenzionali e l'interferometria Difsar: applicazione per l'analisi di movimenti in massa in aree peri-urbane (Calabria – Italia). *Giornale di Geologia Applicata* 2 (2005), pp. 217-226.
- Ceriani M., Fossati D., Di Trapani G., Crosta G.B., Ambrosi C., Novali F., Cespa S., (2004). I movimenti millimetrici degli ultimi dieci anni sul Monte Padrio Varadega. Analisi di un fenomeno di DGPV con la Tecnica PS. *Atti della 8^a Conferenza Nazionale ASITA – Roma 14/17 Dicembre 2004*, 6 pp, on CD-ROM.
- Cello G., Guerra I., Tortorici L., Turco E., Scarpa R., (1982). Geometry of the neotectonic stress field in southern Italy: geological and seismological evidence. *Journal of Structural Geology* 4, pp. 385-393.
- Cello, G., Gambini R., Mazzol, S., Read A., Tondi E., Zucconi V., (2000). *Journ. Geodynamics*, 29, pp. 293-307.
- Chang C. Y., Curlander J. C., (1992). Application of the Multiple PRF technique to resolve Doppler Centroid estimation ambiguity for spaceborne SAR. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, vol. 30, N. 5, Septemebr 1992, pp. 941-949.

- Ciolfi M., Vitti A., Zatelli P., (2003). Sistemi Open Source/Free Software per la gestione delle informazioni territoriali. *Atti della 7^a Conferenza Nazionale ASITA – Verona 28/31 Ottobre 2003*, 7 pp., on CD-ROM.
- Colesanti C., Ferretti A., Colombo D., (2001). Analisi di deformazione in area urbana tramite la tecnica dei Permanent Scatterers (PS). *MondoGIS Aprile 2001*, pp. 24-28.
- Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F., (2001). Il radar satellitare misura le deformazioni relative del terreno con precisione millimetrica. *Atti della 5^a Conferenza Nazionale ASITA – Rimini 9/12 Ottobre 2001*, 6 pp, on CD-ROM.
- Colombo D., Cespa S., (2007). Misure radar satellitari con la Tecnica PS (PSInSAR™). 2° *Riunione del Geology and Information Technology Group – 5 Giugno 2007 – Bevagna (PG)*, www.gitonline.eu/pdf_bevagna/8-TRE_Bevagna.pdf.
- Coren F., Vidmar R., Sterzai P., De Cillia C., (2001). Utilizzo dell'interferometria SAR per la localizzazione di movimenti franosi su larga scala. *Atti della 5^a Conferenza Nazionale ASITA – Rimini 9/12 Ottobre 2001*, 6 pp, on CD-ROM.
- Coren F., Delisle G., Sterzai P., (2003). Ice dynamics of the Allan Hills meteorite concentration sites revealed by satellite aperture radar interferometry. *Meteoritics & Planetary Sciences* 38, Nr. 9, pp. 1319-1330.
- Cornet Y., Doulliez J. Y., Moxhet J., Closson D., Kourgli A., Ozer P., Ozer A., (1997). Use of ERS Tandem data to produce Digital Elevation Model by Interferometry and study land movements by Differential Interferometry in Calabria and Jordan. *Proc. 3rd Symp. on Space and the service of our Environment, Florence, Italy, 17-21 March 1997, ESA SP-414*, 3 Vols., May 1997, pp. 493-497.
- Crawford R. E. (1999) Making the transition from photogrammetry to radargrammetry. Rapport Intermap Technologies Inc, 1170362987 Rapport.
- Crippa B., Crosetto M., (2001). SAR interferometrico differenziale per il rilievo di movimenti e deformazioni. *Atti della 5^a Conferenza Nazionale ASITA – Rimini 9/12 Ottobre 2001*, 6 pp, on CD-ROM.
- Crippa B., Crosetto M., Biescas E., Agudo M., (2003). Controllo di deformazioni del terreno mediante SAR. *Atti della 7^a Conferenza Nazionale ASITA – Verona 28/31 Ottobre 2003*, 6 pp, on CD-ROM.
- Crippa B., Crosetto M., Biescas E., Monserrat O., (2004). Monitoraggio di subsidenze mediante tecnica DInSAR. *Atti della 8^a Conferenza Nazionale ASITA – Roma 14/17 Dicembre 2004*, 6 pp, on CD-ROM.
- Curlander J. C., McDonough R. N., (1991). Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing. *John Wiley & Sons, Inc., United States, 1991*.
- Deffontaines B., (2006). Vers une "révolution" dans la mesure des déformations topographiques urbaines : L'apport de l'imagerie radar interférométrique, *La Recherche*, N° 398, Juin, pp.36-37.
- Deffontaines B., (2005). Apports de l'interférométrie radar DINSAR et PSI pour le suivi de Mouvements de Terrain en zone urbaine. *Ecole thématique CNRS-UMLV: mouvements de Terrain*, pp. 137-144.

- Deffontaines B., Fruneau B., Arnaud A., Leparmentier A.M., Rudant J.P., (2004). Monitoring vertical deformation using permanent scatterers (PS) techniques and structural field works in Montmartre (Paris, France). *EGU, Nice, Avril. EGU04-A-06522*.
- Deffontaines B., Fruneau B., Prunier-Leparmentier A.M., Pajot E., Rudant J.P., Arnaud A., (2004). Urban instability revealed by Dinsar and PS interferometry: The Montmartre case example (Paris, France). *ESA Salzburg spec. paper*.
- Deffontaines B., (2003). MNT et Formation superficielle, chapitre du livre : les formations superficielles, *Y.Dewolf Ed.*
- Deffontaines B., Lee C.T., Pathier E., Yu J.Y., Fruneau B., Chen H.H., Liang L.S, Chen A.J., Chen S.K, Raymond D., Tseng C.L, Rudant J.P., Tsai Y.B., Angelier J., Chang C.P., Chang T.Y., Li F.C., Wang C.T., Hsi H.H., (2001). Preliminary interferometric results on 921 chichi earthquake (central taiwan), *Proc. Int. Workshop on annual commemoration of Chichi earthquake, Vol. 1. Science aspect, sept. 2001, pp.105-110*.
- Delancourt C., Briole P., Achache J., (1998). Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography. Application to Etna. *Geophysical research Letters, 25 (15), pp. 2849-2852*.
- De Grandi G.F., Leysen M., Lee J.S. Schuler D., (1997). Radar reflectivity estimation using multiplicative SAR scenes of the same target: technique and applications. *Proceedings IGARSS, 1997, vol. II, pp. 1047-1050*.
- De Martino M., Serpico S., Corsini G., Gamba., Garzelli A., Vigliotti R., (2001). ECOSAR: elaborazione e classificazione di dati ottici e SAR per la gestione dei rischi ambientali. *Atti della 5^a Conferenza Nazionale ASITA – Rimini 9/12 Ottobre 2001, 7 pp. on CD-ROM*.
- Dewey, J.F., Helman, M.L., Turco, E., Hutton, D.H.W., Knott, S.D., 1989. Kinematics of the western Mediterranean. In: Coward, M.P., Dietrich, D., Park, R.G. (Eds.), *Alpine Tectonics. Special Publication 45. Geological Society, London, pp. 265–283*.
- Eliason, Eric M. and McEwen, Alfred S., (1990). "Adaptive Box Filters for Removal of Random Noise from Digital Images". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, April, 1990, V56, pp. 453-458*.
- Ferretti A., Monti Guarnirei A., Prati C., Rocca F., (1998). Studi sul Radar ad Apertura Sintetica (SAR). <http://www.elet.polimi.it/upload/monti/papers/storiasar/storiasar.html>
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., (1999). Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, vol. 39, pp. 8 - 20 ISSN: 0196-2892*.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., (2000). Non linear Subsidence Rate Estimation using the Permanent Scatterers Technique. *Second International Workshop on ERS SAR Interferometry, "FRINGE 99", Liege, Belgium, 10-12 Nov. 1999, ESA, pp. 1-6*.
- Ferretti A., Novali F., (2006). From DInSAR to PSI: concept, application and challenges in surface deformation monitoring. *TERRAFIRMA Training Course. Copyright – Tele-Rilevamento Europa (2006). <http://www.terrafirma.eu.com>*
- Ferrucci F., Rocca. F., Calabretta G.L., Savio G., Coren F., Hirn B.R. and P. Sterzai (2007). *3-D Tsunami Coastal Hazard Mapping in Sri Lanka by Very-High Resolution, Airborne and*

Spaceborne Remote-Sensing. Institute of Electrical and Electronics Engineers – IGARSS, Barcelona (Spain), paper no. 2008.

- Ferrucci, F., Amelio, M., Sorriso-Valvo, M & C. Tanzi (2000). Seismic prospecting of a slope affected by deep-seated gravitational slope deformation: the Lago sackung, Calabria, Italy. *Engineering Geology*, 57, pp. 53-64.
- Ferrucci, F. (1997). Early Warning Systems. The UNESCO Courier, Special issue: “Natural Disasters : be prepared ! 1, pp. 23-26, UNESCO Paris - translated into 37 languages (1997).
- Ferrucci, F., Gregori, G.P., Guzzi, R., Pavesi, B., Rondinelli, L. (1997). Natural Risk monitoring from Space. *ESA-ESOC Proceedings on the International Space Station Utilisation, European Space Agency, Paris, SP-385, pp. 599-607.*
- Ferrucci, F. (1995). Faudrat-il un jour évacuer Naples? *La Recherche*, 274, 305-309 – translated into Spanish in: *Mundo Científico*, 157, pp. (1995), 465-469.
- Ferrucci, F., Nunnari, G., Puglisi, G. (1995). Routine GPS measurement of a fixed baseline: towards the continuous mode. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 8, pp. 129-140.
- Fitch, J. P. Synthetic Aperture Radar. *Springer-Verlag, New York, 1988.*
- Fortunato G., Ferrucci F., Guerricchio A, (2008). Interferometria SAR per il monitoraggio di subsidenze legate ad attività mineraria: il caso della miniera di salgemma di Belvedere Spinello. 3° Riunione del Geology and Information Technology Group (Italian Geological Society) – 3-5 Giugno 2008 – Offida (AP).
- Fortunato G., Ferrucci F. Utilizzo dell’interferometria SAR per la generazione di DSM ed il controllo delle deformazioni del suolo in Calabria Centrale. *Atti 11ª Conferenza Nazionale ASITA – 6-9 Novembre 2007 – Torino, 6 pp. on CD-ROM*
- Galli, P., Bosi V., (2002). Paleoseismology along the Cittanova fault. Implications for seismotectonics and earthquake recurrence in Calabria (southern Italy). *J. Geophys. Res.*, 107(B3), 10.1029/2001JB000234, pp. 1-19.
- Galli P., Bosi V., (2002). The catastrophic earthquakes of 1638 in Calabria (southern Italy). New insight from paleoseismic investigation. *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2001JB001713.
- Gatelli F., Monti Guarnieri A., Parizzi F., Pasquali P., Prati C., Rocca F., (1994) The wavenumber shift in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, No. 4, pp. 855-865.*
- Gens R., Van Genderen J. L., (1996). SAR Interferometry – Issues, Techniques, Applications. *International Journal of Remote Sensing, volume 17, 1996, pp. 1803-1835.*
- Ghisetti F., (1979). Evoluzione neotettonica dei principali sistemi di faglie della Calabria centrale. *Boll. Soc. Geol. It.* 98, pp. 387 -430.
- Goldstein R. M., Zebker H. A., Werner C. L., (1998). Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science, Vol.23, No. 4, 1988, pp. 713-720.*
- Graham, L.C., (1974). Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping. *Proceeding of the IEEE, volume 62, publication 6, 1974, pp. 763-768.*

- Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04). INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/>
- Gulla G., Antronico L., Sorriso-Valvo M., Tansi C., (2005). Proposta metodologica per la valutazione di indicatori di pericolo e rischio da frana a scala intermedia: l'area della Stretta di Catanzaro (Calabria, Italia). *Geologica Romana*, 200, 597-121,.
- Guerra I, (1984). Gli studi sulla sismicità del territorio calabrese in corso presso l'Università della Calabria. *Rendiconti dell'Osservatorio Geofisico Reggino – Volume XXVIII, anni 1980-81*, pp. 27.
- Guerra I, Lombardo S., (1984). Studio dell'elio quale precursore dei terremoti e come mezzo ausiliario nelle prospezioni strutturali: prime indagini in Calabria. *Rendiconti dell'Osservatorio Geofisico Reggino – Volume XXVIII, anni 1980-81*, pp. 15.
- Guerricchio A., (2000). La fragilità del territorio dell'Italia centro-meridionale desumibile da immagini da satellite. *Atti X Congresso Nazionale Geologi, Roma, 7-10 Dicembre 2000*, pp. 443-482.
- Hagberg J. O., Ulander L. M. H., Askne J., (1993). Repeat-Pass SAR interferometry Over Forested Terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33, No. 2, 1993*, pp. 332-340.
- Harger R. O., (1970). Synthetic Aperture Radar Systems: Theory and Design. *Academic Press, New York, 1970*.
- Heng A. W. C., Lim H., Liew S. C., Tan B. T. G., (1996). Precision focusing algorithms for spaceborne synthetic aperture radar (SAR). *International Journal of Remote Sensing, Vol. 17, 1996*, pp. 629-635.
- Heng A. W. C., Lim H., Liew S. C., Tan B. T. G., (1997). Precision two dimensional focusing of spaceborne synthetic aperture radar data with range-varying Doppler centroid. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol. 2, I.E.E.E., 1997*, pp. 734-736.
- Hoehn E.W., Zebker H.A., (2001). Penetration depths inferred from interferometric volume decorrelation observed over the Greenland Ice Sheet. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens., Vol. 38(6), 2001*, pp. 2571-2583.
- Hong S., H., Won J., S., (2005). ERS-ENVISAT cross-interferometry for costal DEM construction. *Proc. Fringe Workshop, Frascati, Italy, 28 November – 2 December 2005*, 6 pp. on CD-ROM.
- Jarosz A., Wanke D., (2003). Use of InSAR for Monitoring of Mining Deformations. *Proc. FRINGE – Frascati 1/5 Dicembre 2003*, 6 pp. on CD-ROM.
- Jemma F., (1996). JERS-1-Japanese Earth Resources Satellite. *MondoGIS Dicembre 1996*, pp. 43-46.
- Just D., Bamler R., (1994). Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar. *Applied Optics, Vol. 33, No. 20, 1994*, pp. 4361-4368.
- Kampes B., Usai S., (1999). Doris: the Delft Object-oriented Radar Interferometric Software. *2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing. Enschede, The Netherlands – 16/20 August 1999*. ITC-Enschede, 1999, 4 pp on CD-rom.

- Kampes B., Hanssen R., F., Perski Z., (2003). Radar Interferometry with public domain tools. *Proceeding of FRINGE – Frascati 1/5 Dicembre 2003*, pp. 10 on CD-ROM.
- Knott, S.D., Turco, E., (1991). Late cenozoic kinematics of the Calabrian Arc. *Tectonics* 10 (6), pp. 1164–1172.
- Kropatsch W. G., D. Stroble, (1990). The generation of SAR layover and shadow maps from digital elevation models. *IEEE Trans. Geosci. And Remote Sensing*, v53, 1990, pp. 98-107.
- Leberl F.W., Bolter R., (2001). Building reconstruction from Synthetic Aperture Radar images and interferometry. In: *Baltsavias, E.P., Grün, A., Gool, L.v.: Automatic Extraction of Man-Made Objects From Aerial and Space Images (III)*, Lisse, p. 281-290.
- Leva D., Nico G., Rivolta C., (2003). Interferometria SAR da terra per il monitoraggio di frane e deformazioni strutturali. *Atti della 7^a Conferenza Nazionale ASITA – Verona 28/31 Ottobre 2003*, 10 pp. on CD-ROM
- Lian L. S., Wang C. T., Chen K. S., Tsai Y. B., Chen A. J., (2001). Deformation of 921 Earthquake by Satellite Radar Interferometry: Co-seismic and Post-seismic Estimation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Volume 11, No.3, September 2006, pp. 327-336.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W., (1994). Remote sensing and image interpretation. *Third edition*, Wiley & Sons, 1994.
- Lin Q., Vesecky J. F., Zebcker H. A., (1992). New Approach in Interferometric SAR Data Processing. *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing* volume 30, publication 3, 1992, page 560-567.
- Lu Z., Meyer D. J., (2002). Study of high SAR backscattering caused by an increase of soil moisture over a sparsely vegetated area : implications for characteristics of backscattering. *International Journal of Remote Sensing*, Vol 23, No. 6, 2002, pp.1063-1074.
- Mallorquí J. J., Blanco P., Sanz-Marcos J., Duque S., Navarrete D.,(2005). Application of the Coherent Pixels Technique (CPT) to large ERS and Envisat SAR images for deformation series retrieval. *Proc. Fringe 2005 Workshop, Frascati, Italy, 28 November – 2 December 2005*, 6 pp on CD-ROM.
- Mantovani F., Marcolongo B., (1992) Fotogeologia, *La Nuova Italia Scientifica*, 1992.
- Massonet D., Adragna F. (1993). A full-scale validation of Radar Interferometry with ERS-1: the Landers earthquake. *Earth Observation Quarterly*, 41, pp. 1-5.
- Massonnet D., Rabaut T., (1993). Radar interferometry: limits and potential. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 31 (2), pp. 455-464.
- Massonnet D., Feigl K. L., (1998). Radar interferometry and its applications to changes in the earth's surface. *Reviews in Geophysics*, 36 (4), pp. 441-500.
- Meadows P. J., Rosich B., Santella C., (2004). The ERS-2 SAR performance: the first 9 years. *Proc. Of the ENVISAT and ERS Symposium, Salzburg, Austria, 6-10 September 2004*, ESA SP-572.
- Melelli L., (2004). I DEM derivati da sistemi RADAR: uno strumento per l'identificazione dei conoidi alluvionali. *Atti della 8^a Conferenza Nazionale ASITA – Roma 14/17 Dicembre 2004*, 6 pp. on CD-ROM.

- Miranda N., Rosich B., Santella C., Grion M., (2003). Review of the impact of ERS-2 piloting modes on the SAR Doppler Stability. *Proc. Fringe Workshop, Frascati, Italy, 1 – 5 December 2003, 11 pp. on CD-ROM.*
- Monaco, C., Tansi, C., (1992). Strutture transpressive lungo la zona trascorrente sinistra nel versante orientale del Pollino (Appennino calabro-lucano) (Transpressional structures along the left-lateral strike-slip zone on the eastern slope of Mt. Pollino (Calabrian-Lucanian Apennine)). *Bollettino della Società Geologica Italiana 111*, pp. 291–301.
- Monaco C., Tortorici L., (2000). Active Faulting in the Calabrian arc and eastern Sicily. *J. Geodynamics*, 29, pp. 407-424.
- Monti Guarnieri A., (2005). Appunti di RADAR ad Apertura Sintetica. *Note del corso di SAR – Master Carthema 2005.*
- Moran M. S., Peters-Lidard C. D., Watts J. M., McElroy S., (2004). Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 30, No. 5, 2004, pp. 805–826.
- Moretti A., Guerra I., (1997). Tettonica dal Messiniano ad oggi in Calabria: implicazioni sulla geodinamica del sistema Tirreno-Arco Calabro. *Boll. Soc. Geol. It.*, 116, pp. 125-142.
- Moussat, E., Rehault, J. P., and Fabbri, A., (1986). Rifting et evolution tectonosédimentaire du Bassin Tyrrhénien au cours du Néogène et du Quaternaire. *G. Geol.*, sp. issue 481-2, pp. 41-62.
- Ogniben L., (1973). Schema geologico della Calabria in base ai dati odierni. *Geol. Romana 12*, pp. 243-585.
- Parente C., Pugliano A., Santamaria R., (2001). La rappresentazione del territorio tramite TIN e DEM. *Atti della 5ª Conferenza Nazionale ASITA – Rimini 9/12 Ottobre 2001*, 6. pp on CD-ROM
- Pileggi M., (2000). Come fermare la terra sulle acque. *Calabria*, n.158, Febbraio 2000, pp 23-27.
- Pinelli G., De Pasquale G., (2001). Sistema di interpretazione di Immagini SAR (SISAR). Studio di fattibilità. *Atti della 5ª Conferenza Nazionale ASITA – Rimini 9/12 Ottobre 2001*, pp. 7 on CD-ROM
- Piovene G., (1957). Viaggio in Italia. *Mondadori, Milano 1957.*
- Postpischl D., (1985). Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 all'anno 1980. *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Progetto Finalizzato Geodinamica, Graficoop, Bologna*, 239 pp.
- Prati C, Monti Guarnieri A. Rocca F., (1991). SPOT mode SAR focusing with the omega-k technique. *In International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Espoo, Finland, 3-6 June 1991, 1991*, pages 631-634.
- Prati C., Rocca F., (1992). Range Resolution Enhancement with Multiple SAR Surveys Combination. *Proceedings of IGARSS'92, 1992*, pp 1576-1578.
- Prati C., Rocca F., (1993). Improving slant range resolution of stationary objects with multiple SAR surveys. *IEEE Transactions on AES*, Vol. 29, n. 1, pp. 1993, pp. 135-144.

- Prati, C., Rocca F., Monti Guarnieri A, Pasquali P., (1994). ERS-1 SAR Interferometric Techniques and Applications. *ESA report n. 3-7439/92/HGE-I, 1994.*
- Reigber A, Moreira J, (1997). Phase Unwrapping by Fusion of Local and Global Methods. *Proc. IEEE IGARSS'97, Singapore, (1997), Vol. 2, pp. 869-971*
- Richman D., (1971). Three dimensional azimuth-correcting mapping radar. United Technologies Corporation, USA.
- Rocca F., (1987). Synthetic aperture radar: A new application for wave equation techniques. *Stanford Exploration Project Report, SEP-56, 1987, pp. 167-189.*
- Rodriguez E., Martin J. M., (1992). Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radars. *IEE Proceedings-F, vol. 139, no. 2, 1992, pp. 147-159.*
- Rosich B., Esteban D., Emiliani G., Meadows P., Schattler B., Viggiano R., (2000). ERS-2 Mono-Gyro piloting. Impact on ERS-2 SAR data quality and ERS-2 SAR application performance. *Rapport reference ES-TN-ADQ-BR02, 22 June 2000, pp. 36.*
- Rossetti, F., Faccenna, C., Goffè, P., Moniè, P., Argentieri, A., Funicello, R., Mattei, M., (2001). Alpine structural and metamorphic signature of the Sila Piccola Massif nappe stack (Calabria, Italy): insights for a tectonic evolution of the Calabrian Arc. *Tectonics 20 (1), pp. 112–133.*
- Ruecker G., Siegert F., (2000). Burn Scar Mapping and Fire Damage Assessment using ERS-2 SAR images in East Kalimantan, Indonesia. *IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.*
- Scandone P., (1979). Origin of the Tyrrhenian Sea and Calabrian Arc. *Boll. Soc. Geol. It. 98 (1979), pp. 27–34.*
- Scharroo, R. and Visser P.N.A.M., (1998). Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. *Journal of Geophysical Research, 103, no. C4, 1998, pp. 8113 - 8127.*
- Schmidt, D.A., Bürgmann R., (2003). Time dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large InSAR data set. *J. Geophys. Res., 108, doi:10.1029/2002JB002267, 2003.*
- Skolnik, M. I. Radar Handbook. *McGraw-Hill, New York, 1990.*
- Smith E. K., Weintraub S., (1953). The constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies. *Proceedings of the I.R.E., 41, pp. 1035-1037.*
- Sorriso-Valvo M. e Tansi C. (1996). Grandi Frane e Deformazioni Gravitative Profonde di Versante della Calabria. Note illustrative della Carta al 250.000. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria vol. 19, pp. 395 -408.*
- Sowter A., Warren M., (2005). Reducing the DEM error effect in Differential Interferometry. *Proc. Fringe Workshop, Frascati, Italy, 28 November – 2 December 2005, 7 pp. on CD-ROM.*
- Tansi C., Antronico L., Sorriso-Valvo M., (1998). Active tectonics and fan construction in the Lametta Terme Area, Calabria, Italy. Preliminary results. *International Workshop “The resolution of Geological Analysis and Model for Earthquake Faulting Studies”, Camerino, 3/6 Giugno 1998, pp. 85-86.*

- Tansi C., Muto F., Critelli S., Iovine G., (2007). Neogene-Quaternary strike-slip tectonics in the central Calabrian Arc (southern Italy). *Journal of Geodynamics* 433 (2007), pp. 393-414.
- Tomiyasu K. (1978). Tutorial review of synthetic aperture radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface. *Proceedings of the IEEE, Vol. 66, No. 5, , 1978, pp. 563-583.*
- Tortorici, L., 1982. Lineamenti geologico-strutturali dell'Arco Calabro Peloritano (Geologic-structural lineaments of the Calabrian-Peloritan Arc). *Società Italiana di Mineralogia e Petrografia* 38, pp. 927-940.
- Tortorici L., Monaco C., Tansi C., Cocina O., (1995) Recent and active tectonics in the Calabrian arc (Southern Italy). *Tectonophysics* 243, pp. 37-55.
- Tortorici G., Bianca M., De Guidi G., Monaco C., Tortorici L., (2003). Fault activity and marine terracing in the Capo Vaticano area (southern Calabria) during the Middle-Late Quaternary. *Quaternary International* 101-103 (2003), pp. 269-278.
- Tou, J. T., Gonzalez R. C., (1974). Pattern Recognition Principles. *Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts (1974).*
- Turco E., Malito (1988). Formazione di bacini e rotazione di blocchi lungo faglie trascorrenti nell'Appennino meridionale. *Riassunti 74° Congr. Soc. Geol. It., Sorrento, 1988.*
- Turco E., Maresca R., Cappadona P. (1990) - La tettonica plioleistocenica del confine calabro-lucano: modello cinematico. *Mem. Soc. Geol. It., 45, pp. 519-529.*
- Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K., (1982). Microwave Remote Sensing: Active and Passive Vol. II: Radar Remote Sensing, Surface Scattering and Emission Theory. *Addison-Wesley Pub. Co., 1982, pp. 634-636.*
- Usai, S. (2001). A new approach for long term monitoring of deformations by differential SAR interferometry. *Delft University Press, Delft, 165 pp., 2001.*
- Van Dijk J. P., Bello M., Brancaleoni G. P., Cantarella G., Costa V., Frixia A., Golfetto F., Merlini S., Riva M., Torricelli S., Toscano C., Zerilli A., (2000). *Tectonophysics* 324 (2000), pp. 267-320.
- Verdone G.R., Lopinto E., Marzo C., Viaggiano R., Volpe F., (2001). Generazione Automatica di DEM con Dati ERS e Criteri di Valutazione. *Atti della 5ª Conferenza Nazionale ASITA – Rimini 9/12 Ottobre 2001, 6 pp. on CD-ROM.*
- Wehner D. R. (1987). High Resolution Radar. *Artech House, 1987.*
- Wiley Carl A., (1985). Synthetic aperture radars: A paradigm for technology evolution. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, volume 3, 1985, pp. 440-443.*
- Williams S., Bock Y., Pang P., (1998). Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products. *J. Geophys. Res., 103, B11, 1998, pp. 51-67.*
- Wolski W., Marsella M., Tommasi P., (2004). Applicazione della tecnica D-InSAR all'analisi delle deformazioni del versante sinistro della Val di Susa presso Pont Ventoux. *Atti della 8ª Conferenza Nazionale ASITA – Roma 14/17 Dicembre 2004, pp. 7 on CD-ROM.*
- Zebker, H. A., Goldstein R. M., (1986). Topographic mapping from interferometric SAR observations. *J. Geophys. Res., 91 (B5), pp. 4993-4999.*

- Zebker, H. A., Villasenor J., (1992). Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 5, pp. 950, 1992.
- Zebker H. A., Werner C. L., Rosen P. A., Hensley S., (1994). Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Data. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 32 (4), pp. 823-836.
- Zisk, S. H., (1972). A new, Earth-based Radar Technique for the Measurement of Lunar Topography. *Moon*, No.4 pp. 296-306.

Libri

- Hanssen R. F. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, pp. 308.
- Galati G., (2004). Radar e navigazione. *Edizioni TEXMAT*, pp. 609.
- Solimini D., (2004). Appunti dalle lezioni di Campi Elettromagnetici. Fondamenti e Prime Applicazioni. *Edizioni TEXMAT*, pp. 270.

Tesi di laurea e di dottorato

- Dean M. (2002). L'interferometria SAR nelle applicazioni di Ingegneria Ambientale. *Università degli Studi di Trieste, Facoltà di Ingegneria, Corso di laurea in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio*, pp. 260.
- Gaccione L. (2000-2001). Ipotesi progettuale per il ripristino della sezione idraulica del torrente Cantagalli nel tratto finale di S. Eufemia-Lametia. *Università degli Studi della Calabria, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea in Ingegneria Civile, Indirizzo Idraulica*, pp. 77.
- Hoffmann J., (2003). The application of satellite radar interferometry to the study of land subsidence over developed aquifer systems. *Department of Geophysics of Stanford University*, pp. 229.
- Hooper A. (2006) Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation. *Departement of Geophysics of Stanford University*, pp. 144.
- Iencarelli M. (2000-2001). Deformazioni Gravitative Profonde di Versante nel territorio di Gizzeria-Capo Suvero e loro influenza sulla stabilità di importanti infrastrutture e sulle variazioni della linea di costa. *Università degli Studi della Calabria, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea in Ingegneria Civile, Indirizzo Idraulica*, pp. 250.
- Pathier E. (2003). Apport de l'interferometrie radar differentielle à l'étude de la tectonique active de Taiwan. *Laboratoire de Tectonique, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) et du Laboratoire des Géomatériaux de l'Université de Marne-la-Vallée*, pp. 280.

Rapporti

- Pellegrini M., Canuti P. (2004). SAR-RER Monitoraggio dei centri abitati a grande rischio da frana nella regione Emilia Romagna - *Rapporto Finale (2004)*, <http://www.terra.unimore.it/download/GeoApplicata/>

Versace P., Biondi D., Cervarolo G., Cruscomagno F., De luca D., Garcea G., Mendicino G., Petrucci O., (2006). Piano di interventi infrastrutturali di emergenza e di prima sistemazione nei comuni della Provincia di Vibo Valentia colpiti dagli eventi atmosferici del 3 Luglio 2006 - *Relazione generale (2006). Italiano.*
http://www.protezionecivilecalabria.it/commissario3531/htm_piano_interventi_infrastrutturali.php

Siti Internet

<http://avi.gndci.cnr.it>

<http://earth.esa.int>

<http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/>

<http://www.arssacalabria-agrometeo.it>

<http://www.autoritadibacinocalabria.it>

<http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/>

<http://www.eurimage.com/sitoitalia/DESCW/descw.html>

<http://www.gamma-rs.ch>

<http://www.terraeacqua.eu/>

Lista delle Figure e delle Tabelle

Figura 1. Situazione della Calabria nella penisola italiana.	7
Figura 2. Carta Litologica della Calabria Scala 1:250000.	9
Figura 3. Geometria d’acquisizione SAR (da Pathier, 2003).	16
Figura 4. Acquisizione dati SAR in strip-map mode.	18
Figura 5. Esempio di insieme di dati raw.	18
Figura 6. Due elementi spaziali sono distinti come unici.	19
Figura 7. Due elementi spaziali sono distinti come diversi.	20
Figura 8. Antenna footprint.	22
Figura 9. Meccanismo del “ doppler beam sharpening ”.	23
Figura 10. Doppler History: variazione nel tempo dello shift in frequenza dovuto all’effetto Doppler.	24
Figura 11. Concetto di Apertura Sintetica.	26
Figura 12. Rappresentazione della forma d’onda in notazione complessa.	29
Figura 13. Decomposizione del segnale riflesso nelle componenti “ I ” e “ Q ”.	29
Figura 14. Chirp pulse.	30
Figura 15. Modulazione in frequenza del chirp.	30
Figura 16. Autocorrelazione del chirp.	31
Figura 17. Dati RAW dopo l’operazione di range compression.	31
Figura 18. Geometria SAR semplificata per l’acquisizione dei dati in strip-mapping.	32
Figura 19. Dati range compressed dopo l’operazione di azimuth compression.	34
Figura 20. Esempio di focalizzazione per un solo punto sintetico.	35
Figura 21. Influenza dell’angolo locale d’incidenza.	37
Figura 22. Backscattering.	38
Figura 23. Traiettoria del segnale inviato dall’antenna e effetti sull’immagine dei diversi tipi di retrodiffusione.	38
Figura 24 Esempio dell’influenza della CDC sul radar backscattering.	39
Figura 25 Coordinate geografiche VS coordinate SAR per un’immagine Spot e ERS.	39
Figura 26. Foreshortening I.	40
Figura 27. Foreshortening II.	40
Figura 28. Layover I.	41
Figura 29. Layover II.	41
Figura 30. “Cornflakes”. Aree con “ no data pixel ” per effetto dell’ortorettificazione.	42
Figura 31. Shadow.	42
Figura 32. Filtraggio “Multi-look”	43
Figura 33. Despeckling con l’utilizzo del “ filtro di LEE ”.	44
Figura 34. Immagini di intensità (modulo).	48
Figura 35. Immagini di coerenza.	50
Figura 36. Schematizzazione della misura DInSAR.	52

Figura 37. Imaging geometry per l'interferometria radar satellitare.....	53
Figura 38. Approccio interferometrico : l'idea fondamentale.	54
Figura 39. Decorrelazione temporale osservata sull'Etna.....	58
Figura 40. Due esempi di segnali atmosferici nella misura di fase DInSAR.	62
Figura 41. Mappa Geologica schematica del settore mediterraneo centrale.	69
Figura 42. Segmentazione a blocchi dell'Arco Calabro nel tardo Pliocene - Quaternario.....	70
Figura 43. Caratteristiche sismo-tettoniche della “rift-zone siculo-calabra ”.	71
Figura 44. Foto aerea e carta topografica della città e l'hinterland di Lamezia Terme.	73
Figura 45. Carta tettonica schematica della Calabria Centrale.....	74
Figura 46. Carta strutturale relativa all'area del lametino.....	75
Figura 47. Carta geologica della città e l'hinterland di Lamezia Terme.	76
Figura 48. Carta geologica dell'hinterland di Sant'Eufemia di Lamezia Terme	77
Figura 49. Foto aerea e carta topografica della città e l'hinterland di Vibo Valentia.....	79
Figura 50. Carta strutturale della penisola di Capo Vaticano e dell'off-shore Tirrenico	80
Figura 51. Carta morfo-tettonica della Penisola di Capo Vaticano.....	81
Figura 52. Carta geologica della città e l'hinterland di Vibo Valentia.....	83
Figura 53. Foto alluvione Vibo Valentia del 3 Luglio 2006.	84
Figura 54. Cartografia di sintesi delle aree ad elevato rischio di frana del territorio di Vibo Marina, Pizzo Calabro	87
Figura 55. Cartografia di sintesi delle aree ad elevato rischio di frana e le aree di attenzione dal punto di vista idraulico del territorio di Vibo Valentia.....	88
Figura 56. Cartografia di sintesi delle aree ad elevato rischio di frana del territorio di Lamezia Terme.	89
Figura 57. Cartografia di sintesi delle aree di attenzione dal punto di vista idraulico del territorio relativo all'aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme.....	90
Figura 58. Rilievo e carta delle pendenze della Calabria.	93
Figura 59. Mappa di uso del suolo Calabria. Corine Land Cover (livello 1).	94
Figura 60. Mappe della densità media di pioggia e della distribuzione media di temperatura riferite ai 12 mesi.	95
Figura 61. Schema relativo alla proiezione planimetrica della linea di vista del satellite.....	96
Figura 62. Copertura delle immagini satellitari SAR centrate sul territorio di studio Track 451, Frame 2825.	98
Figura 63. Mappa di esposizione dei versanti per il territorio investigato.	98
Figura 64. Copertura immagini satellitari SAR centrate sul territorio di studio Track 451, Frame 2817, 2835	99
Figura 65. Schema di calcolo dell'interferogramma.	103
Figura 66. Insieme della catena di processing implementata in SARscape	105
Figura 67 . Utilizzo della finestra di scanning.	109
Figura 68 . Componente lineare della fase interferometrica su immagini acquisite a grande distanza di tempo.	111
Figura 69 . Componente lineare della fase interferometrica per immagini acquisite a breve distanza di tempo.	113
Figura 70. Separazione delle tre componenti della fase interferometrica.	114
Figura 71. Rappresentazione dei colori in formato RGB.	117
Figura 72. Fasi principali della classificazione ILU implementate nell'algorithm di separazione ed in SHISSOR	119

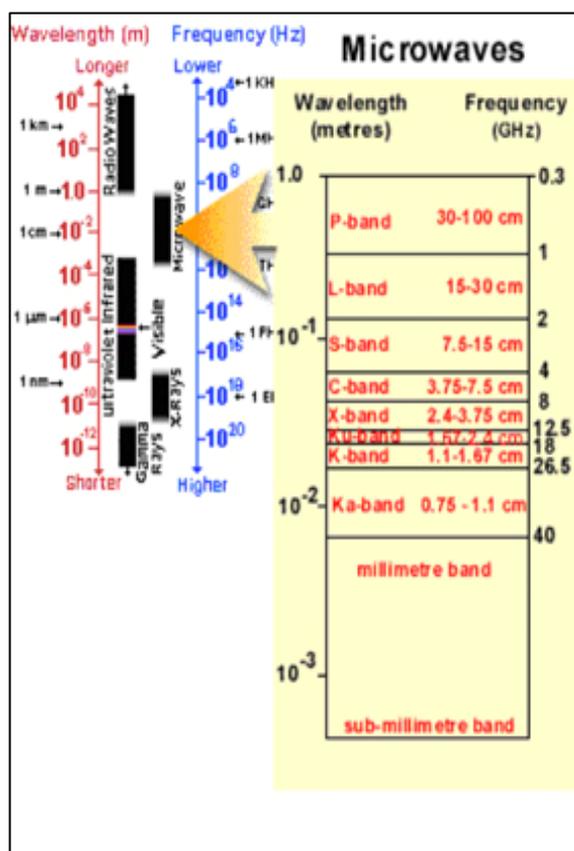
Figura 73. Insieme della catena di processamento implementata in SARscape e utilizzata per la produzione di cartografia ILU.	119
Figura 74. Catena di processing implementata in SARscape.....	123
Figura 75. Aree estratte dagli interferogrammi, in geometria slant range, oggetto di analisi dedicate.....	124
Figura 76. Immagine d'intensità relativa all'area del centro urbano di Lamezia Terme in geometria slant range.	125
Figura 77. Interferogramma filtrato (19931005 – 20000121) in geometria slant range sull'intero periodo coperto dai dati derivati dal sensore ERS.....	126
Figura 78. Interferogramma filtrato (ERS / 19931005 – 19950824) in geometria slant range a circa due anni di distanza.	126
Figura 79. Interferogramma filtrato (ERS / 19950720 – 19970725) in geometria slant range a circa due anni di intervallo.	127
Figura 80. Interferogramma filtrato (ERS / 19950824 – 19970725) in geometria slant range su un periodo di circa due anni.	127
Figura 81. Immagine d'intensità relativa alla città ed all'aeroporto Sant'Eufemia di Lamezia Terme.	128
Figura 82. Interferogramma filtrato (19931005 – 19950824), slant range, a circa due anni di intervallo.....	129
Figura 83. Interferogramma filtrato (19950824 – 19961227), slant range, a circa un anno e mezzo di intervallo.	129
Figura 84. Interferogramma filtrato (19950824 – 19980814), slant range, a tre anni di distanza.....	130
Figura 85. Interferogramma filtrato (19961227 – 19970516) in geometria slant range a cinque mesi di distanza..	130
Figura 86. Immagine d'intensità (geometria slant range) relativa ai centri urbani di Vibo Marina e Pizzo.	131
Figura 87. Interferogramma filtrato (19950824 – 19970725), slant range, a circa due anni di distanza.	132
Figura 88. Interferogramma filtrato (19960809 – 19970725), slant range, a circa un anno di distanza.	132
Figura 89. Interferogramma filtrato (19970725-19980814) in geometria slant range a circa un anno di distanza..	133
Figura 90. Immagine d'intensità relativa all'area della città di Vibo Valentia.	134
Figura 91. Interferogramma filtrato (19950824 – 19980814) in geometria slant range su periodo di circa 3 anni.	135
Figura 92. Interferogramma filtrato (19970516 – 19980814), slant range, relativo ad un periodo di circa 1 anno.	135
Figura 93. Interferogramma filtrato (19980814 – 19990312), slant range, su un periodo di circa 7 mesi.....	135
Figura 94. Interferogramma filtrato (19980814 – 20000121), slant range, su un periodo di circa 1 anno e mezzo.	136
Figura 95. DSM VS DTM.	139
Figura 96. DSM da interferometria SAR – M. Fuji, Giappone.	139
Figura 97. Prodotti derivati dal processing di una “coppia SAR tandem”.....	140
Figura 98. DSM ottenuto dalla coppia Tandem B.	141
Figura 99. Mappa delle differenze di elevazione (DTM C.C.R. VS DSM InSAR).....	142
Figura 100. Istogramma delle differenze di altezza tra il DSM InSAR e quello di riferimento (DTM C.C.R.).....	143
Figura 101. Profili Ovest > Est attraverso un'area della piana di Lamezia (coord. origine 38°54' N, 16 13' E). ...	143
Figura 102. Profili Nord > Sud attraverso un'area della piana di Lamezia (coord. origine 39° N, 16 16' E).	144
Figura 103. Primo DSM TerraSAR-X	144
Figura 104. Immagine RGB derivata dalla combinazione multitemporale di 3 immagini SAR di ampiezza.	147
Figura 105. Immagine RGB derivata dalla combinazione multitemporale di 3 immagini SAR di ampiezza.	147

Figura 106. Classificazione ISODATA dei dati derivati dalla combinazione RGB di 3 immagini SAR (11 gennaio, 9 agosto e 21 dicembre 1996).....	148
Figura 107. Combinazione RGB multidifference di due coppie di immagini in geometria slant range.	150
Figura 108. Immagine ILU 19930725 - 19931109.	151
Figura 109. Rappresentazione grafica delle geometrie di acquisizione SAR.....	154
Figura 110. Schematizzazione del procedimento utilizzato per ricavare i valori reali di spostamento del terreno..	155
Figura 111. Un interferogramma relativo al sito di Vibo Marina in geometria slant range.	156
Figura 112. Interferogramma filtrato e geocodificato (11/93 - 01/97).	163
Figura 113. Interferogramma filtrato e geocodificato (08/95 – 07/97).	164
Figura 114. Interferogramma filtrato e geocodificato (08/95 – 08/98).	165
Figura 115. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all’interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19930727-20000121).	167
Figura 116 Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all’interferogramma filtrato e geocodificato (ENVISAT: 20030305-20050916).	168
Figura 117. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all’interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19930727-20000121).	169
Figura 118. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all’interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931005-19980814).	170
Figura 119. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all’interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931109-19991007).	171
Figura 120. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all’interferogramma filtrato e geocodificato (ENVISAT: 20040409-20050916).	172
Figura 121. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all’interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931109-19991007).	173
Figura 122. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all’interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931005-19990312).	174
Figura 123. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all’interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931109-19991007).	175
Figura 124. Dati quantitativi di deformazione assoluta relativi all’interferogramma filtrato e geocodificato (ERS: 19931005-19990312).	176
Figura 125. Stralcio della mappa delle anomalie di Elio (1983).	177
Figura 126. Linea di livellazione sul versante tirrenico.	178
Figura 127. Variazioni tra le livellazioni del 1983 e quelle del 1966 da Pizzo a Sant’Eufemia (IGMI).	179
Figura 128. Carta relativa alle linee sismiche sull’area dell’Aeroporto Sant’Eufemia di Lamezia Terme.	180
Figura 129. Carta di sintesi osservazioni derivate per l’area dell’Aeroporto Sant’Eufemia di Lamezia Terme	181
Figura 130. La nube del temporale che ha provocato l'isolata alluvione lampo in Calabria.	183
Figura 131. Carta di sintesi delle osservazioni derivate per l’area urbana di Vibo Valentia.....	185
Figura 132. Particolari dello stato fessurativo degli immobili collocati a ridosso di Via 25 Aprile.	187

Tabella 2.1. Effetti dell'esposizione e della pendenza del rilievo sulle immagini SAR e impatto sulla fattibilità dell'analisi interferometrica.....	67
Tabella 4.1 Dati da inserire in funzione del tipo di operazione da svolgere.....	119
Tabella 4.2. Separazione del contributo lineare alla fase interferometrica da quello non lineare.	120
Tabella 4.3. Separazione del contributo lineare alla fase interferometrica dovuto all'atmosfera da quello dovuto al movimento del terreno.....	120
Tabella 4.4. Stima del grado di coerenza, di ampiezza media e di differenza di ampiezza per le diverse tipologie di oggetti presenti sul territorio in esame.....	122
Tabella 5.1. Dati relativi alle acquisizioni SAR utilizzate.....	144
Tabella 5.2. Dati statistici derivati dalla differenza tra il DSM DInSAR e quello di riferimento.....	147
Tabella 5.3. Tabella colore relativa al valore della retrodiffusione più alto (1) o più basso (0) di 0,5.....	152
Tabella 5.4 Definizione della tabella colore relativa al valore della variazione della retrodiffusione tra due acquisizioni.....	153
Tabella 6.1. Prodotti cartografici acquisiti, generati e inseriti nel database.....	163
Tabella 6.2. Parametri del sistema di proiezione.....	163

Allegato I - Radiazione e spettro elettromagnetico.

Il termine energia elettromagnetica è riferibile a tutta l'energia che si propaga con la velocità della luce ($3 * 10^8$ m/s nel vuoto) sotto forma d'onda e include di conseguenza luce, calore e onde radio. Le fonti di tali energie, in particolare, considerate nel campo del telerilevamento, possono essere divise in due categorie : quelle naturali, come il Sole e la Terra, e quelle artificiali, come il radar o il laser. La radiazione elettromagnetica è classificata sulla base della lunghezza d'onda in diverse "regioni" o "bande spettrali" diversamente utilizzate in telerilevamento. L'insieme di queste bande costituisce lo spettro elettromagnetico. Spostandosi dalle lunghezze d'onda più corte verso quelle più lunghe si incontrano, dopo i raggi cosmici, i raggi gamma e i raggi X, non registrabili con i metodi della teledetezione, la regione ultravioletta (0,27 μm - 0,40 μm), che è la prima banda in cui possono funzionare sistemi specifici di telerilevamento. Tuttavia a causa dell'elevato assorbimento di questo tipo di radiazione da parte dell'atmosfera, gli esempi d'applicazione concreta sono piuttosto limitati. La regione visibile dello spettro si estende tra 0.4 e 0.7 μm ; tale porzione dello spettro resta la più utilizzata dai sistemi di teledetezione, come per esempio dagli apparecchi di tipo fotografico. Si incontra quindi il campo dell'infrarosso, compreso tra 0.7 e 300 μm ; la radiazione infrarossa può essere misurata solamente in corrispondenza di specifiche "finestre" dello spettro, poiché nei restanti intervalli questa risulta assorbita dall'atmosfera. Troviamo successivamente la regione delle microonde, con un campo d'esistenza tra 300 μm e 300 cm. Il più conosciuto sistema a microonde attivo e senza dubbio il RADAR (Radio Detection and Ranging).



Allegato II - RADAR e micro-onde

Il RADAR (RADio Detection And Ranging) è un sensore attivo, poiché emette e nello stesso tempo registra energia : onde elettromagnetiche sono inviate a colpire la superficie di oggetti-bersaglio e ritornano verso il sensore per essere catturate e registrate. Le immagini RADAR sono rappresentazioni in bianco e nero dei valori di retrodiffusione di una superficie qualunque nel campo delle microonde.

L'impiego del RADAR permette di ottenere differenti vantaggi:

- **L'acquisizione RADAR è indipendente dall'illuminazione** : essendo un sistema attivo, la sua radiazione colpisce i bersagli sulla superficie terrestre e ne misura i segnali di riflessione. Le immagini possono così essere acquisite giorno e notte, indipendentemente dall'illuminazione solare. Ciò si rivela particolarmente utile alle alte latitudini ;

- **L'acquisizione è indipendente dalla copertura nuvolosa (vale a dire dalle condizioni atmosferiche)** : uno dei più caratteristici elementi distintivi dell'utilizzo delle microonde e che esse sono capaci di penetrare la copertura nuvolosa poiché nella loro lunghezza d'onda (5,6 centimetri) l'attenuazione atmosferica è molto piccola, cosa che non si produce invece nei sistemi ottici e infrarossi, aventi una lunghezza d'onda inferiore ;

- **Il controllo dell'emissione della radiazione elettromagnetica** ;

- **Controllo della geometria dell'immagine** : essendo il RADAR un sistema attivo, la configurazione geometrica che regola l'illuminazione del terreno può essere variata sulla base delle caratteristiche e delle dimensioni della zona investigata, agente sull'altitudine del satellite o dell'aereo che invia il segnale e sull'angolo di depressione. Si può così ottimizzare la geometria dell'immagine e il target di illuminazione in accordo con gli obiettivi che si vogliono raggiungere ; - **Accesso a differenti parametri confrontabili con il sistema ottico** : le immagini ottenute da un sistema ottico contengono informazioni sulle caratteristiche della superficie delle immagini (per esempio i colori), le immagini a microonde invece rivelano informazioni sulla geometria e sulle proprietà dielettriche della superficie o del volumetriche del target studiato (per esempi la rugosità). È importante considerare che le caratteristiche di un'area variano con il tempo ; diverse stagioni dell'anno solare registrano proprietà differenti della stessa superficie. Bisogna dunque, in tutti i tipi di ricerche, conoscere la data esatta della registrazione dell'immagine;

- **Accesso a informazioni di sub-superficie** : le micro-onde sono capaci di penetrare più profondamente nella vegetazione rispetto a quelle ottiche ; le lunghezze d'onda più lunghe forniscono delle informazioni sugli strati più profondi. La capacità di penetrazione dipende anche dalle condizioni di umidità del terreno : suoli secchi permettono una capacità di penetrazione elevata rispetto a quelli umidi che permettono il passaggio delle onde solo per pochissimi centimetri di profondità.

La porzione di spettro elettromagnetico che comprende le micro-onde include lunghezze d'onda comprese tra e 1mm e 1m. In particolare le lunghezze d'onda e le rispettive frequenze utilizzate dai sensori RADAR sono le seguenti :

- **Banda Ka e K** : hanno lunghezze d'onda molto corte e furono tra le prime ad essere utilizzate sui sistemi RADAR aviotrasportati. Oggi sono meno utilizzate. La loro lunghezza d'onda media è di 0.86 cm ;

- **Bande X** : impiegate intensamente per scopi militari su piattaforme aeree per esplorazione e cartografia. Le lunghezze d'onda predominanti sono di 3 e 3.2 cm. ;

- **Bande C** : utilizzata in diversi campi di ricerca sia su piattaforme aeree che su quelle spaziali (ERS-1, ERS-2 et RADARSAT) ;

- **Bande S** : utilizzata dal satellite russo ALMAZ ;

- **Bande L** : utilizzata dal satellite americano SEASAT, dal giapponese JERS-1 e da sistemi trasportati da aerei NASA ;

- **Bande P** : a le lunghezze d'onda maggiori ; risulta utilizzata dai sistemi satellitari sperimentali NASA.

Les micro-onde sono capaci di penetrare più intensamente la vegetazione rispetto ai satelliti ottici ; la profondità di tale penetrazione dipende dall'umidità e dalla densità della vegetazione, in relazione alla lunghezza d'onda delle micro-onde. Les bande P e L, a lunghezza d'onda maggiore, penetrano meglio di quelle a lunghezza d'onda ridotta (delle bande X e K), dunque :

- Le bande **X** e **K** ottengono delle informazioni sugli strati superiori della vegetazione ;

- Le bande **S** e **C** contengono delle informazioni sulla biomassa ;

- Le bande **P** e **L** ottengono delle informazioni sugli strati più bassi della vegetazione e sul terreno del sottobosco.

Allegato III - Radar VS Ottico

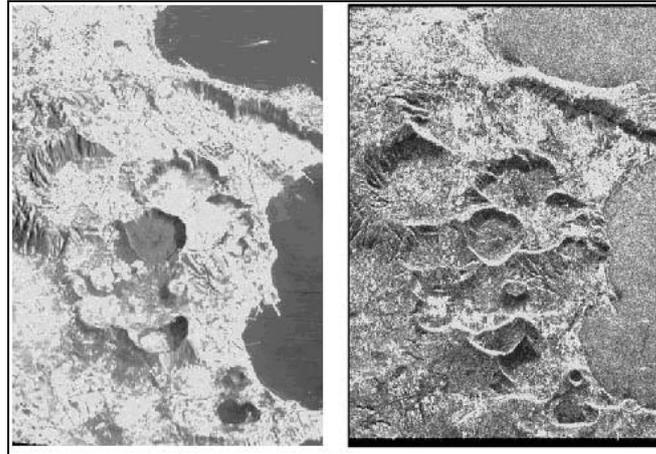


Figura 1. Confronto tra un'immagine ottica (satellite SPOT) e una SAR (satellite ERS-1) dell'area dei Campi Flegrei (Napoli). L'immagine ottica è stata messa nella geometria SAR per rendere possibile il confronto (Ferretti et al, 1998).

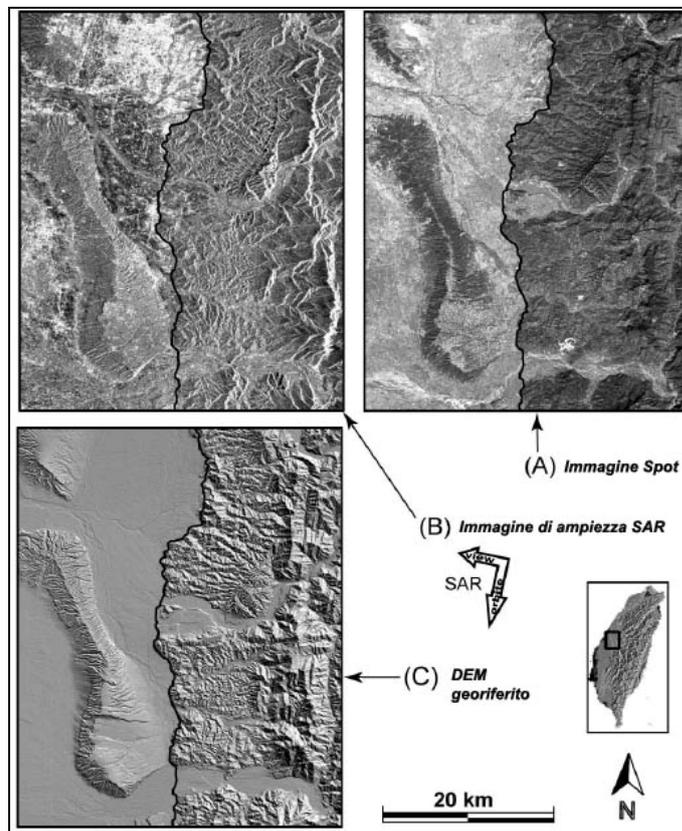
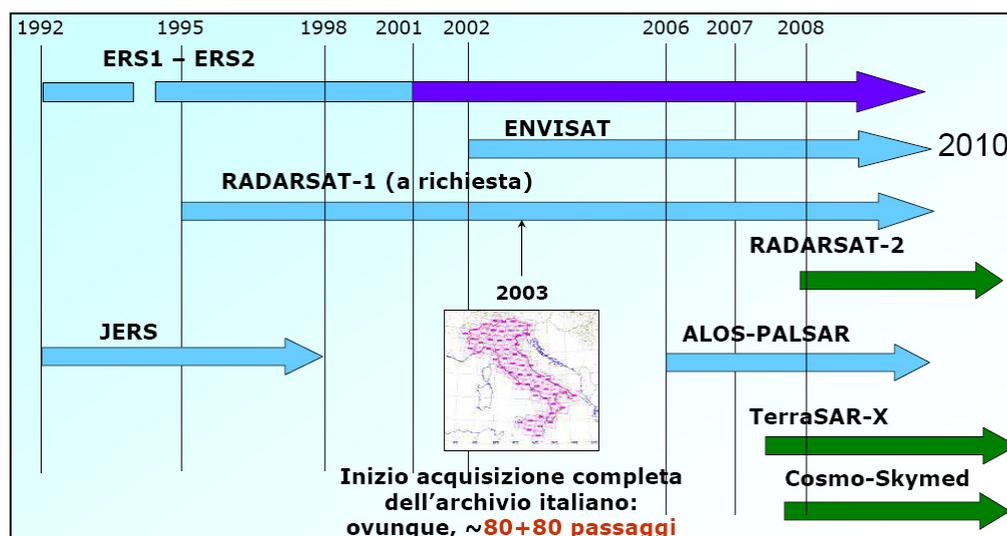


Figura 2. Confronto tra un'immagine SAR (ERS), un'immagine ottica (SPOT, mode P) e un DEM (regione di Taichung – Taiwan – la faglia di Chelungpu è indicata col tratto nero). La zona chiara nel nord dell'immagine SAR corrisponde alla città di Taichung. Si noti la differenza geometrica nelle zone dei rilievi in rapporto al DEM. In quest'ultimo sono messe ben in evidenza i rilievi montuosi e le zone urbane, mentre l'immagine SPOT presenta un contrasto forte in relazione alla copertura vegetale. La scala è indicativa per l'immagine SAR perché questa risulta fortemente variabile in relazione alla pendenza del terreno. L'osservazione vale anche per l'immagine SPOT ma in misura decisamente minore (da Pathier E, 2003).

Allegato IV - Lista delle missioni SAR satellitari

Missione	Anno	ΔT (day)	H_{sat} (Km)	f_o (GHz)	B_R (MHz)	Φ_{inc} (deg)	Swath (Km)
Seasat*	1978	3	800	1.275	19.00	20 (23)26	100
SIR-A	1981	-	235	1.278	19.00	(50)	50
SIR-B*	1984	-	235	1.282	12.00	(15)-(64)	10-60
Cosmos1870	1987-89	var	250	3.000	*	(30)-(60)	20-45
ALMAZ	1991-92	-	300	3.000	uncoded	(30)-(60)	20-45
Magellan*	1989-92	var	290-2000	2.385	2.26	(17)-(45)	20
Lacrosse1,2,3	1998/97	var	275	3.000	*	steerable	variable
ERS-1*	1991-92	3	790	5.300	15.55	21(23)26	100
“	1992-93	35	790	5.300	15.55	21(23)26	100
“	1993-94	3	790	5.300	15.55	21(23)26	100
“	1994-95	168	790	5.300	15.55	21(23)26	100
“	1995-2000	35	790	5.300	15.55	21(23)26	100
ERS-2*	1995-	35	790	5.300	15.55	21(23)26	100
JERS-1*	1992-98	44	568	1.275	15.00	26(39)41	85
SIR-C/X-SAR	Apr1994	-	225	1.240	20.00	(15)-(55)	10-70
“	Apr1994	-	225	5.285	20.00		10-70
“	Apr1994	-	225	9.600	10-20	(15)-(45)	15-45
SIR-C/X-SAR*	Oct1994	1	225	1.240	20†	(55)	21-42
“	Oct1994	1	225	5.285	20†	(55)	21-42
“	Oct1994	1	225	9.600		(15)-(45)	15-45
Radarsat	1995	24	792	5.300	11-30	(20)-(49)	10-500
SRTM	2000	0	233	5.300	9.50	(52)	225
“	2000	0	233	9.600	9.50	(52)	50
ENVISAT	2001	35	800	5.300	14.00	(20)-(50)	100-500
ALOS	2006	45	700	1.270	28/14	(8)-(60)	40-350
TerraSAR-X	2007	11	514	9.650	150	(15)-(60)	10-100
Radarsat-2	2007	24	798	5.300	12-100	(20)-(60)	20-500
Cosmo-Skymed	2007	16	620	9,58	65-118	(25)-(50)	10-200

ΔT (day): periodo di rivisitazione; H_{sat} (Km): altitudine del satellite; f_o (GHz): carrier frequency; B_R (MHz): range bandwidth; Φ_{inc} (deg): angolo di incidenza; Swath (Km)



Satelliti SAR attualmente disponibili in interferometria.

Allegato V - Proposta Cat1 accettata da ESA

Title: *Multi-method assessment of differential sink rates of subsiding urban centres and infrastructural networks in Central Calabria, Southern Italy*

Application domains and location:

- Geology
- Hazards

Study Area:

- Calabria, Southern Italy, Europe

Executive summary:

The study area encompasses two strategic sectors in the current economic assets of Calabria: the agricultural plain of Lamezia Terme – where cluster the Salerno-Reggio Calabria motorway, the Rome-Villa San Giovanni railway and the Lamezia Terme-Sant'Eufemia international airport – and the province of Vibo Valentia, hosting the most of international touristic venues of the whole Calabria region.

The plain area is subsidence-prone, as proved by pre-Roman settlements found tens of metres underground beneath Lamezia, whereas the mountain ranges are marked by enhanced slope instability. The presence of shallow clay horizons and the general weakness of the territory, trading-off hydro-geological risk exposure with long standing infrastructural deficiencies, cause the onset and the development of landslide and/or swift subsidence episodes.

Since infrastructural networks suffer differential ground deformation mainly around flexure points, and easily undergo accident if the differential sink rate is high, ground deformation heterogeneities were looked for in a preliminary phase in 50 towns in the Province of Vibo Valentia, nearby and in the surroundings of the crossing of the abovementioned transport infrastructures (railway, highway and airport). Preliminary results obtained with ERS 'tandem' pairs acquired late in the '90s, have highlighted significant lateral heterogeneity of sink rates next to all investigated places, and the consequent need for a higher precision analysis to carry out at higher repetition rates.

In this project, we plan to carry out interferometric SAR analysis in application to Digital Surface Model generation, reconstruction of ground deformations with strategic refresh rates (by Differential InSAR [DInSAR hereafter] and Persistent Scatterers Interferometry [PSI hereafter] techniques) and Interferometric Land Use classification.

The target – to be achieved with recent ASAR data acquired between 2002 and 2007, and data previously acquired by ERS-1 and ERS-2 – will be validated against geological and geotechnical datasets (existing for the area of interest since the post-WW2 agricultural and infrastructural rehabilitation), and vectorially integrated in a standard GIS.

Results, suitable for Decision Support, will also be formatted in ways compatible with 3-D WebGIS, aimed to ease access to territorial intelligence through browsable information, while putting stronger focus on information availability rather than on specialistic GIS post-processing.

Principal Investigator :

Last name FERRUCCI
First name Fabrizio
Title Professor
Email Address fabrizio.ferrucci@carthema.org

Co-Principal Investigator :

Last name FORTUNATO
First name Gerardo
Address Via F. Normando, 38
Town Mormanno
Postcode 87026
Phone 0039.347.3660638
Title Research Geologist
Email Address gerardo.fortunato@poste.it

Administrative Authority :

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA – Dipartimento di Scienze della Terra
Via Pietro Bucci 15 A – 87036 Rende (Cosenza) Italy
Phone +39.0984.493606 Fax +39.0984.493601
Email Address segr.dister@unical.it

Subsidiary Technical Authority :

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA – Polo di Vibo Valentia
Piazza San Leoluca Valentianum – 89900 Vibo Valentia (Italy)
Phone +39.0963.471006 / 472006 / 471621 Fax +39.0963.540311
Email Address info@carthema.org ; segreteria.univibo@virgilio.it

The funding source of this project stays with the University of Calabria.

TEAM COMPOSITION, EXPERIENCE, INNOVATION and CONTRIBUTION

Team Composition:

- Prof. Fabrizio FERRUCCI (Geophysicist, Space Geophysicist at the University of Calabria), Chairman, Degree Courses in Natural Risk Management; Co-ordinator, University Pole of Vibo Valentia; Director, Master Course in Thematic Cartography for the Territorial Management.
- Prof. Benoît DEFFONTAINES (Geologist and Geomorphologist at the University of Paris EST) Director, Laboratory of Geomaterials and Geological Engineering – Institut Francilien des Sciences appliquées (IFSA), University of Paris-EST ;
- Prof. Alessandro GUERRICCHIO (Applied Geologist at the University of Calabria – Dipartimento di Difesa del Suolo);
- Dr. Gerardo FORTUNATO (Research Geologist at the University of Calabria - Department of Earth Science),
- Dr. Andrea GUARINO (Research Geologist at the University of Calabria-Pole of Vibo Valentia),
- Dr. Paolo STERZAI (Research Engineer, OGS-National Institute for Oceanography and Applied Geophysics – Department of Geophysics of the Lithosphere - Trieste).

Experience of the team:

- Fabrizio FERRUCCI, is P.I. of the national pilot project on forest fires “SIGRI” (2007-2010) of the Italian Space Agency. He was leader of project “HYPERDEM” (2005-2006), for the high-resolution 3-D mapping of the coastal areas of Sri Lanka; also Leader (1998-2004) of the Euro-Mediterranean institutional project “EuroMED-Civil Protection” of the European Commission, Directorates General RELEX (External Relations) and AIDCO (Europe-Aid).

- Benoit DEFFONTAINES, is ALOS Principal Investigator on Taiwan Natural Hazard program (PI 112). He is also involved in the Taiwan-France collaboration dealing with neotectonics, structural geology and geodetic measurements, in the monitoring of urban and anthropic deformations of the topography.
- Alessandro GUERRICCHIO, is Unit Leader in the National Group for Hydro-Geological Disaster Mitigation of the Italian National Research Council, with special focus on slope instability. His current research interests related to this proposal, concern the GPS control of both crustal deformations and slope instability remediation works.
- Paolo STERZAI, is the coordinator of the Research Group (Cartography - Remote Sensing of The National Institute of Oceanography and Experimental Geophysics – OGS –Trieste). He is expertise in the active SAR remote sensing and of the gravimetric, microgravimetric and magnetometric measures.
- Gerardo FORTUNATO received the Degree in Geological Sciences at the University of Calabria in 2000, a DEA in Applied Geophysics at the Institut Français du Petrole in 2002, and a Master in Thematic Cartography – during which specialised in active remote sensing and GIS for geosciences – at the University of Calabria in 2006.
- Andrea GUARINO received the Degree in Geological Sciences at the University of Rome in 2001 and a Master in Thematic Cartography – during which specialised in passive remote sensing and GIS for geosciences – at the University of Calabria in 2006.

Overall, the team's expertise meets the requirements for spaceborne and ground-based capacity of observation, active and passive remote-sensing, geophysical inverse and forward modelling, geological interpretation and thematic mapping.

Innovative character of the proposal:

The main goal of this proposal is to detect, locate, reconstruct – going up to 10 years backwards – characterize, and quantify the surface deformation by use of both “standard” DInSAR and PSI processing methodologies. These data will be integrated with the thematic maps obtained by ILU classification. In combination, these radar techniques provide for a satisfactory robustness of results.

Despite the enormous interest for the radar satellite data able to supply quantitative information about ground deformation phenomena, for the study area, such a thorough research approach in this study area has never been prepared.

A part of the work will be devoted to the extensive test and validation of the code “SHISSOR” developed at the “Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS” of Trieste. The latter, was a partner of the proposer UNICAL in all DEM/DSM mapping endeavours after the carrying out of project HYPERDEM in Sri Lanka, 2005-2006. SHISSOR is based on an original algorithm enabling robust separation of the three components of the interferometric phase: noise, atmosphere and motion. The software will be validated on areas characterised by different reflectance, texture and sink rates.

However, the major innovation is not expected to arise from developments in SAR-related methodologies, but from the discovery of synoptic, quantitative information on differential sink rates, and the understanding of the very reasons for their location and dynamics.

Improved synoptic knowledge on near-vertical deformation rates is expected to bring significant advantages in terms of control of the subsident and/or slipping dynamics of sensitive territorial components (as urban centres and infrastructural networks). Knowledge, geographically arranged in GIS, will be used for improving the prevention capacity, both active and passive, contribute in the slope instability rate prediction, and the prioritisation of public works.

The principal obstacle to overcome is represented by the expected low interferometric coherence of rural, forest and suburban areas.

Contribution to mission objectives:

The work is expected to contribute in extending the application domain derived of the radar SAR analysis in the Geosciences and in more specific way in the infrastructures monitoring. The latter will examine and validate the PSI technique to calibrate the deformation; it will also experiment if the ILU classification techniques is usable for the production of the central Calabria thematic cartography.

In this way it would be justified, also economically, the purchase of a single product derived from the radar remote sensing for the qualitative and quantitative cartography production.

Moreover, it will be estimated if today ENVISAT data can constitute a profit in order to follow the deformations in a so heterogeneous territory such us Calabria.

DETAIL DESCRIPTION AND SCHEDULE OF THE PROPOSAL

Detailed description:

General goal. Radar imagery methods have sparsely been used for monitoring deformation phenomena in Calabria. Looseness of the overall picture is mainly due to interferometry constraints that often limit investigations; however, when observation conditions are favourable to coherence keeping, the use of radar data within InSAR, DInSAR or Persistent Scatterer Interferometry processes may pave the road towards key-information on ground deformation, soil and slope stability, and the related assessment of actions required for mitigating such phenomena.

The goal of this study, is to detect and analyse centimetric topographic changes by both conventional DInSAR and Persistent Scatterer Interferometry, aimed to define a customized set of robust tools suited to monitor deformations in the order of 10 cm/year.

All available data [various data (geological, hydrogeological, geotechnical...), levelling comparison, piezometric...], will then be used in order to validate and explain observed topographic deformations. The goal is also to separate the topographic variations of natural and anthropic origin (and particularly, those due to bad/unwise territorial management). SAR data will also concur in producing thematic land use cartography.

The final objective is manifold:

- to use all the obtained results and deduced knowledge to model observed phenomena and their origins, as to develop an operational tool for a better monitoring of ground instability
- to control and explain most threatening situations for involved population, urban settlements and infrastructures;
- to understand if the use of a single product derived from the radar remote sensing is profitable, also economically, for the production of semi-qualitative and quantitative thematic cartography.

Specific goals: Location, characterization of the deformations soils and quantification of the induced movement in the Piana of Lamezia and Vibo Valentia hinterland , using SAR interferometry.

The principal issue is the characterization of the deformation by interferometry combined with technical knowledge such as mechanical behaviour of soils. For this, we wish to combine traditional terrestrial methods (ground geology, geotechnical properties, hydrogeology, land cover monitoring) with methods arising from space imagery (optical and radar imagery, conventional radar interferometry and the PSI technique), and to integrate them in a GIS oriented to designing prevention actions. The SAR processing's results may improve spatially our local geotechnical and geological knowledge. Then, using all available statistic data of damage (insurance, state publication, geotechnical expert cabinet), the various causes of the topographic deformations will be taken into account: interferometry results will help to separate the topographic variations of natural and antropic origin. The existing traditional methods to measure displacements (precision levelling, GPS...) are certainly precise but inappropriate for a regional scale monitoring. They are generally expensive, require a long time, and are difficult to apply to a wide territory. They provide a limited space cover and non-continuous data through time. The methods resulting from the space radar imagery will bypass some limits, in comparison with traditional techniques:

> The Radar Interferometry is the first method of surface displacement monitoring deduced from the radar imagery. It has no equivalent to detect and measure very small ground movements of centimetric amplitude, with a spatial resolution of a few tens of meters. Its advantage, compared with the traditional methods, consist in providing a continuous deformation map on large area (100km x 100km) (Massonnet et al., 1998). In addition, the radar images are available since 1991 thanks to the satellite ERS-1, with a repeat pass cycle of 35 days. This allowed studying archives data and consequently passed long-term deformations. Several studies showed the ability of interferometry to detect and map the subsidence (for most of them from anthropic origins) related to the extraction of fluids (gas, oil, water...), or to industrial activity and mining. These characteristics make this method essential for the study of the small deformation effect such as topographic subsidence. This technique has nevertheless two major limitations: the loss of coherence as well as atmospheric artefacts, disturbing the measurement of the deformations.

We propose to detect the small movements on the study area using a series of ERS and also ENVISAT radar images. In this part of the job the scenario of DInSAR application technique will regard the identification of ground deformations in areas where such phenomenon is a priori not or only partially known. In this scenario the technique will be used as "*early detection tool*". About 100 images, distributed over ten years, will be used to build interferograms series, from which we will establish maps of displacements for each date of acquisition. We will use them to monitor displacement and in particular their space-time evolution.

> The "Persistent Scatterers" Interferometry (PSI) techniques allow measuring the displacements, on a pixel by pixel basis. Reliable measurements of deformations can be obtained on a certain number of pixels called "Persistent Scatterers", which can be used like "natural GPS points" by analyzing the phase history of each of them. This technique is not limited by the loss of temporal coherence and avoids that the atmospheric artefacts that are filtered out. It is then possible to obtain a mill metric precision in favourable conditions, in particular in urban field where the density of PS is very high (Ferretti et al., 2001). However, in opposition to conventional radar interferometry, displacements are obtained on numerous sparse points. The preliminary and quantitative results obtained from the previous step will constitute the starting point for successive analysis by PSI.

We propose during this work to use and validate this technique on various sites of study in the central Calabria region by processing the data with the software chain developed by SARMAP Information Corporation.

The PSI technique would be a tool of high precision in the monitoring of topographic variations and would allow a better understanding of the complex movement of an urban object and evaluate the relation between the damage and the ground stress. The building quality will be taken in account.

> For applications based on the use of multiple-pass InSAR the temporal variability of water vapour concentration can lead to significant differences in the propagation delay experienced on different passes, with implications for the quality of the derived data products. As anticipated, a part of the job will be devoted to the validation of SHISSOR software developed by the "Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS". The software, still in experimental phase, is based on an separation algorithm between the linear and not linear component. Today one of the main problems to deteriorate the interferometric signal is the problematic separation of its components. The scientific community is very concentrated about this argument and an achievement in this direction would represent a big step forward in the SAR Interferometric technique application. The first tests carry out on areas to known deformation and on interferograms very disturbed from atmosphere noise turn out interesting. However the software must be validated on more heterogeneous areas.

> The ILU (Interferometric Land Use) products derive from the classification of the investigated target through the use of the three base colors (red, green and blue), in order to represent (RGB) in visually effective way three various types of elements: the house and rockcrop or with small vegetation, the forests and the water. ILU classification is therefore a simple method for having a general vision of the examined territory characteristics. We propose to use this technique in order to change detection analysis, preliminary characterization of the area or for additional information.

The software for listed techniques use and relative products generation is already available and the team is formed and possesses all the experience in order to use them.

All results obtained from interferometry will be integrated within a GIS (e.g. ArcGIS™), as well as precise geological and geotechnical data of the “Dipartimento di Difesa del Suolo”.

The final objective is to use all the obtained results and deduced knowledge to modelise the observed phenomena and their various origins. Besides, to develop an operational tool, aimed at making a easy access to territorial intelligence through browsable information, for a better monitoring of ground movements and infrastructure networks's management.

Awaited products:

- structural and deformation maps
- maps of inferred, geologically active structures;
- deformations origins identification;
- quantification of the relative origins contributions (natural and human);
- synthesis of the deformation framework.
- returns on short- and mid-term monitoring operations

Schedule:

- T0 : reception of the whole of spaceborne data;
- T0 + 3 months. Acquisition of all other available data (levelling, geological and hydrogeological data...). Damage zone spatial analysis and their occurrence. Beginning of the database construction;
- T0 + 6 months. ESA data pre-processing. Processing and analysis of the differential INSAR interferograms with ERS1, ERS2, and ENVISAT images for construction of radar deformation maps. Database will be still in progress;
- T0 + 9 months. Processing and analysis with PSI techniques of damaged urban object with ERS1/ERS2 and ENVISAT;
- T0 + 12 months. Processing and analysis with PSI techniques of damaged infrastructure object with ERS1/ERS2 and ENVISAT;
- T0 + 15 months. Processing and analysis with ILU Classification techniques with ERS1, ERS2, and ENVISAT images for radar thematic maps construction. Database will be still in progress
- T0 + 18 months. Synthesis of the results and mapping of the Piana di Lamezia and Vibo Valentia hinterland classification and deformation soils.

BIBLIOGRAPHY of the TEAM (upload file)_

DATA REQUIREMENTS: INSTRUMENTS and PRODUCTS

Products selection:

ERS 1 and ERS 2 missions, ENVISAT

ESA Data Requirement:

ERS 1 and ERS 2 missions; Track 451 Frame 2817, 2835 (Desc);

Track 086 Frame 0783, 0765 (Asc).

ENVISAT ASAR; Track 2451 Frame 2817, 2835 (Desc);

Track 2086 Frame 0783; 0765 (Asc).

Non-ESA Data Requirement:

Aerial Orthophoto (Centro Cartografico Regione Calabria, Lamezia Terme – Zona Industriale).

Land cover provided by the IAURIF

Meteo data - hygrometry, winds, rainfall, ETP (Consorzio CRATI, Lamezia Terme)

Geological maps (Centro Cartografico Regione Calabria, Lamezia Terme – Zona Industriale, in collaborazione con il Servizio Geologico Nazionale)

Allegato VI - Lista immagini SAR utilizzate.

IMMAGINI ERS

Source	Frame	Track	Orbit	Satellite	Acquisition Date	Product Type
CAT1-4815	2817	451	10616	ERS-1	19930727	_slc
CAT1-4815	2817	451	11618	ERS-1	19931005	_slc
CAT1-4815	2817	451	12119	ERS-1	19931109	_slc
CAT1-4815	2817	451	20980	ERS-1	19950720	_slc
CAT1-4815	2817	451	21481	ERS-1	19950928	_slc
CAT1-4815	2817	451	21982	ERS-1	19950928	_slc
CAT1-4815	2817	451	22483	ERS-1	19951102	_slc
CAT1-4815	2817	451	2810	ERS-2	19951103	_slc
CAT1-4815	2817	451	23485	ERS-1	19960111	_slc
CAT1-4815	2817	451	6818	ERS-2	19960809	_slc
CAT1-4815	2817	451	8822	ERS-2	19961227	_slc
CAT1-4815	2817	451	10826	ERS-2	19970516	_slc
CAT1-4815	2817	451	11828	ERS-2	19970725	_slc
CAT1-4815	2817	451	17339	ERS-2	19980814	_slc
CAT1-4815	2817	451	18842	ERS-2	19990312	_slc
CAT1-4815	2817	451	20345	ERS-2	19990312	_slc
CAT1-4815	2817	451	44026	ERS-1	19991216	_slc
CAT1-4815	2817	451	24353	ERS-2	19991217	_slc
CAT1-4815	2817	451	24854	ERS-2	20000121	_slc
CAT1-4815	2835	451	10616	ERS-1	19930727	_slc
CAT1-4815	2835	451	11618	ERS-1	19931005	_slc
CAT1-4815	2835	451	12119	ERS-1	19931109	_slc
CAT1-4815	2835	451	21481	ERS-1	19950824	_slc
CAT1-4815	2835	451	21982	ERS-1	19950928	_slc
CAT1-4815	2835	451	23485	ERS-1	19960111	_slc
CAT1-4815	2835	451	24487	ERS-1	19960321	_slc
CAT1-4815	2835	451	4814	ERS-2	19960321	_slc
CAT1-4815	2835	451	6818	ERS-1	19960809	_slc
CAT1-4815	2835	451	7319	ERS-2	19960913	_slc
CAT1-4815	2835	451	8822	ERS-2	19961227	_slc
CAT1-4815	2835	451	10826	ERS-2	19970516	_slc

CAT1-4815	2835	451	11828	ERS-2	19970725	_slc
CAT1-4815	2835	451	13832	ERS-2	19971212	_slc
CAT1-4815	2835	451	17339	ERS-2	19980814	_slc
CAT1-4815	2835	451	20345	ERS-2	19990312	_slc
CAT1-4815	2835	451	44026	ERS-1	19991216	_slc
CAT1-4815	2835	451	24353	ERS-2	19991217	_slc
CAT1-4815	2835	451	24854	ERS-2	20000121	_slc
EURIMAGE	2825	451	18341	ERS-2	19981023	_raw
EURIMAGE	2825	451	43024	ERS-1	19991007	_raw
EURIMAGE	2825	451	23351	ERS-2	19991008	_raw
EURIMAGE	2825	451	25355	ERS-2	20000225	_raw
EURIMAGE	2825	451	27860	ERS-2	20000818	_raw

IMMAGINI ENVISAT - ASAR

Source	Frame	Track	Orbit	Satellite	Acquisition Date	Product Type
EURIMAGE	2825	451	10524	ENVISAT	20040305	_slc
EURIMAGE	2825	451	11026	ENVISAT	20040409	_slc
EURIMAGE	2825	451	13531	ENVISAT	20041001	_slc
EURIMAGE	2825	451	14533	ENVISAT	20041210	_slc
EURIMAGE	2825	451	16537	ENVISAT	20050429	_slc
EURIMAGE	2825	451	17539	ENVISAT	20050708	_slc
EURIMAGE	2825	451	18541	ENVISAT	20050916	_slc