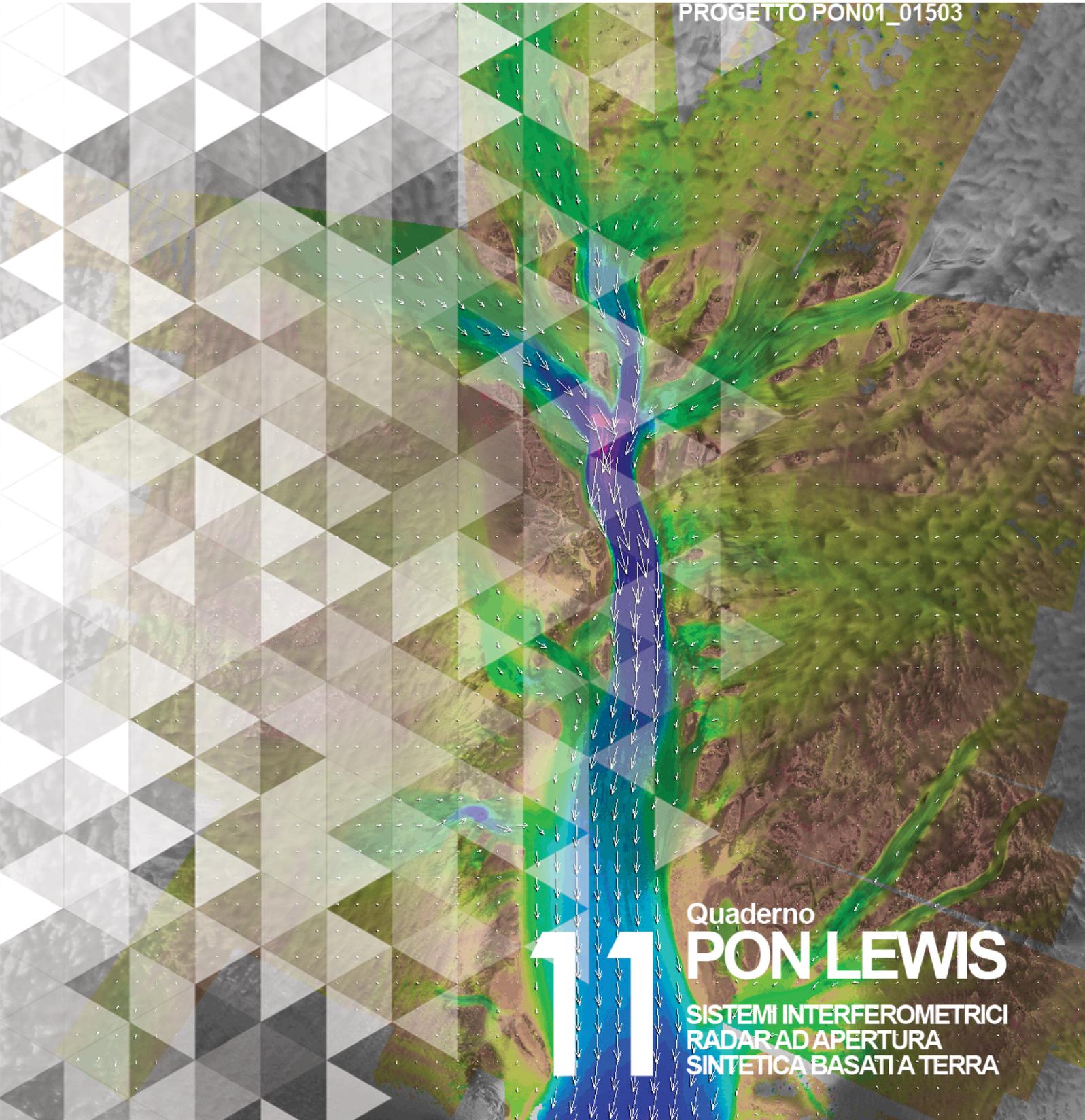


SISTEMI INTEGRATI PER IL MONITORAGGIO, L'EARLY WARNING  
E LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO  
LUNGO LE GRANDI VIE DI COMUNICAZIONE



investiamo nel vostro futuro  
PROGETTO PON01\_01503



Quaderno  
**11** **PON LEWIS**  
SISTEMI INTERFEROMETRICI  
RADAR AD APERTURA  
SINTETICA BASATI A TERRA



**autostrade//Tech**



A cura di Nicola Casagli | **DELIVERABLE WP 3.6**

**Sistemi interferometrici radar ad apertura sintetica basati a terra**



*Sistemi integrati per il monitoraggio, l'early warning e la mitigazione del rischio idrogeologico lungo le grandi vie di comunicazione"*

## **Premessa**

Frane e inondazioni sono un problema di grande rilevanza nel nostro Paese. Negli ultimi anni le vittime e i danni dei disastri idrogeologici hanno raggiunto livelli inaccettabili e impongono un grande e immediato impegno della comunità nazionale per cercare di mitigare il livello di rischio, utilizzando strategie articolate ed efficaci capaci di integrare, in una visione organica, interventi strutturali e non strutturali.

Su questi temi l'Università della Calabria è impegnata da anni in attività di studio e di ricerca di rilevanza nazionale e internazionale e nella diffusione e promozione della cultura della previsione e prevenzione del rischio idrogeologico. Nel 2011 insieme ad altri partner, ha promosso un progetto di ricerca triennale, "Sistemi integrati per il monitoraggio, l'early warning e la mitigazione del rischio idrogeologico lungo le grandi vie di comunicazione", finalizzato allo sviluppo di un sistema complesso e articolato di preannuncio delle frane da impiegare per le fasi di previsione/prevenzione del rischio idrogeologico.

Il Progetto, indicato con l'acronimo LEWIS (Landslide Early Warning Integrated System), è stato svolto, nel periodo 2012-2014, nel quadro del Programma Operativo Nazionale 2007-13 "Ricerca e Competitività".

I risultati conseguiti sono descritti in questa collana di Quaderni PON LEWIS.

Il progetto è stato sviluppato dall'Università della Calabria e Autostrade Tech S.p.A. insieme ai partner industriali Strago e TDGroup, alle Università di Catania, di Reggio Calabria e di Firenze e al CINID (Consorzio Interuniversitario per l'Idrologia). Per l'Ateneo calabrese hanno partecipato diversi laboratori e gruppi di ricerca: CAMILab (con funzione di coordinamento),  $\mu$ Wave, Geomatica, Nems, Geotecnica, Dipartimento di matematica.

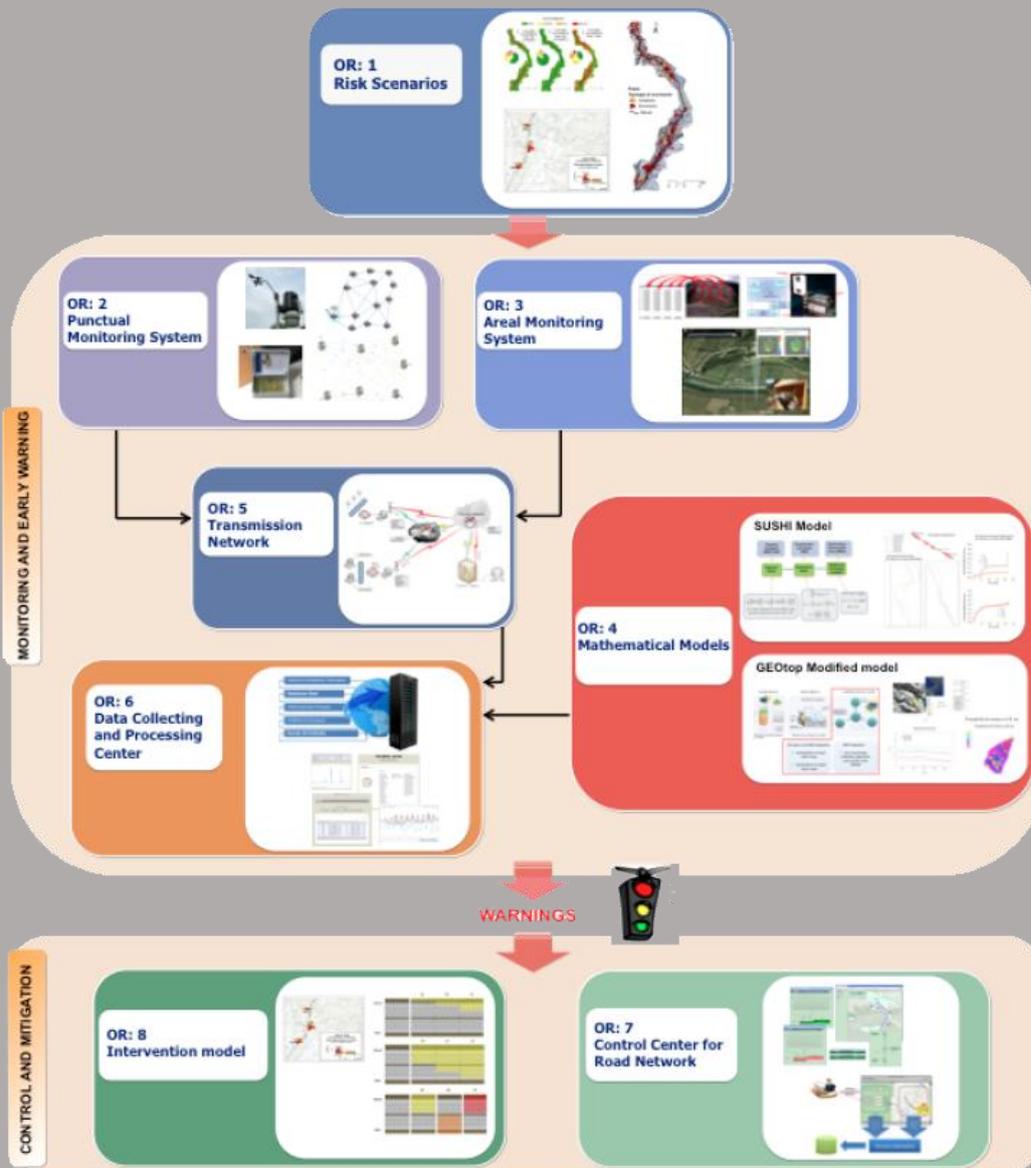


Figura 1 - Articolazione del sistema integrato di monitoraggio dei versanti e di preannuncio dei movimenti franosi

Il progetto è finalizzato allo sviluppo di un sistema di monitoraggio dei versanti e di preannuncio dei movimenti franosi che possono interessare le grandi vie di comunicazione e all'identificazione dei conseguenti interventi non strutturali di mitigazione.

Il sistema è articolato in due sottosistemi (fig. 1):

- ✓ Monitoraggio e preannuncio,
- ✓ Controllo e mitigazione,

che richiedono la preventiva individuazione degli scenari di rischio ossia dei danni che l'eventuale attivazione di una frana può produrre sugli elementi a rischio presenti (infrastruttura viaria, autoveicoli, persone). La procedura originale sviluppata nell'ambito del progetto prevede l'identificazione, lungo il tratto autostradale di interesse, delle aree soggette a movimenti franosi e la conseguente definizione dei relativi scenari di evento e di rischio.

Il sottosistema *Monitoraggio e preannuncio* è formato da diverse componenti: rete di monitoraggio "puntuale" che comprende sensori che misurano localmente l'inizio degli spostamenti superficiali o profondi; rete di monitoraggio "areale" che include sensori che controllano a distanza il fenomeno franoso con tecniche radar; modelli matematici di simulazione dell'innesco e della propagazione dei movimenti franosi. Nel progetto LEWIS sono state sviluppate numerose componenti innovative e sono state modificate e migliorate altre componenti già esistenti. In particolare tra i sensori puntuali sono stati sviluppati i sistemi SMAMID e POIS; tra quelli areali sono stati realizzati un radar in banda L, uno scatterometro, un interferometro; tra i modelli si sono sviluppati e/o migliorati: GEOtop, SUSHI, SCIDDICA.

La raccolta dei dati misurati dai sensori è affidata ad un unico sistema di trasmissione dati che trasmette anche le informazioni necessarie per il funzionamento dei modelli. Il sottosistema è completato da un Centro di acquisizione ed elaborazione dei dati (CAED) che, sulla base dei dati misurati dai sensori e delle indicazioni dei modelli, valuta la situazione di pericolo lungo il tronco autostradale emettendo i relativi livelli di criticità.

I livelli di criticità emessi dal CAED sono l'elemento di collegamento tra il sottosistema *Monitoraggio e preannuncio* e il sottosistema *Controllo e mitigazione*. Gli avvisi di criticità sono acquisiti dal Centro di comando e controllo del traffico (CCCT) che, sulla base di un modello di intervento predefinito, attiva le procedure standardizzate per la mitigazione del rischio, che vanno dalla

sorveglianza diretta del tratto di interesse da parte di squadre tecniche all'interruzione del traffico su entrambe le direzioni di marcia.

Il progetto prevede anche lo sviluppo di attività sperimentali su tre tronchi autostradali lungo la A3, la A16 e la A18, nonché l'erogazione di un Master di secondo livello denominato ESPRI (ESperto in Previsione/Prevenzione Rischio Idrogeologico).

Il progetto di ricerca è stato organizzato in Obiettivi Realizzativi (OR), ciascuno dei quali suddiviso in Work Package (WP), a loro volta articolati in Attività Elementari (AE). In totale erano previste 11 OR, 47 WP e 243 AE. In particolare le OR 1-8 riguardano la ricerca e si articolano in 26 WP e 139 AE. Le OR 9-11 sono dedicate a sperimentazione, governance e trasferimento tecnologico, integrazione e aggiornamento dell'attività di ricerca nella fase di Sviluppo Sperimentale e si articolano complessivamente in 21 WP e 104 AE.

I Quaderni che compongono questa collana sono stati costruiti con riferimento ai singoli WP, per la parte che riguarda la ricerca, e quindi ogni Quaderno contiene la descrizione dei risultati conseguiti nel WP, articolata in base alle AE previste.

Sono, inoltre, previsti altri tre Quaderni:

Quaderno 0 che contiene una descrizione di sintesi, in inglese, dei risultati conseguiti nell'ambito del progetto.

Quaderno 28 che contiene l'informazione relativa alle attività di divulgazione dei risultati scientifici.

Quaderno 29 che contiene la descrizione dei risultati conseguiti con l'attività formativa.

Il Quadro editoriale complessivo è riportato in tabella 1:

QUADERNO	OR	WP	TITOLO
<b>0</b>	-	-	Research outcomes
<b>01</b> Parte prima	1	1.1	Linee guida per l'identificazione di scenari di rischio
<b>01</b> Parte seconda	1	1.1	Linee guida per l'identificazione di scenari di rischio
<b>02</b>	2	2.1	Monitoraggio idrogeologico
<b>03</b> Parte prima	2	2.2	Monitoraggio con unità accelerometriche (Sistema SMAMID)
<b>03</b> Parte seconda	2	2.2	Monitoraggio con unità accelerometriche (Sistema SMAMID)
<b>04</b>	2	2.3	Circuiti integrati a bassa potenza per sistemi di monitoraggio con unità accelerometriche
<b>05</b>	2	2.4	Monitoraggio con sensori puntuali di posizione e inclinazione (Sistema POIS)
<b>06</b>	3	3.1	Sviluppo di uno scatterometro a risoluzione variabile
<b>07</b>	3	3.2	Elettronica di bordo dello scatterometro ed inclinazione
<b>08</b>	3	3.3	Sviluppo di un radar in banda L
<b>09</b>	3	3.4	Tecniche di analisi e sintesi di segnali radar per la simulazione accurata di scenari complessi
<b>10</b>	3	3.5	Elettronica di bordo del radar in banda L

QUADERNO	OR	WP	TITOLO
11	3	3.6	Sistemi interferometrici radar ad apertura sintetica basati a terra
12	4	4.1	Modello areale per il preannuncio delle frane da innesco pluviale (Modello GEOtop)
13	4	4.2	Modelli completi di versante di tipo puntuale per il preannuncio di movimenti franosi (Modello SUSHI)
14	4	4.3	Modelli di propagazione delle frane tipo colate (Modello SCIDDICA)
15	5	5.1	Rete Wireless di Telecomunicazioni: sviluppo e scelta dei parametri di progetto
16	6	6.1	CAED. Acquisizione dati: architettura del sistema
17	6	6.2	CAED. Elaborazione dei dati
18	7	7.1	CCCT. Progettazione
19	7	7.2	CCCT. Interfaccia verso il centro di acquisizione ed elaborazione dati
20	7	7.3	CCCT. Interfaccia con altre centrali operative e canali di diffusione delle notizie
21	7	7.4	CCCT. Modulo per la presentazione e convalida delle allerte
22	7	7.5	CCCT. Modulo per la gestione delle informazioni di traffico
23	7	7.6	CCCT. Integrazioni con moduli speciali

QUADERNO	OR	WP	TITOLO
24	8	8.1	Definizione del modello di intervento e predisposizione del Piano di Emergenza
25	8	8.2	CCCT. Gestione delivery allerte e attivazione squadre d'intervento
26	8	8.3	CCCT. Gestione percorsi alternativi
27	9	9.1 - 9.11	Sperimentazione
28	10	10.1 - 10.2	Piano di comunicazione e diffusione
29	-	-	Master ESPRI (Esperto in Previsione/Prevenzione Rischio Idrogeologico)

Tabella 1 - Quadro editoriale complessivo della collana di Quaderni PON LEWIS

31 dicembre 2014

Il Responsabile Scientifico del progetto PON LEWIS

*Pasquale Versace*



## INDICE

ATTIVITA' ELEMENTARE 3.6.1

- 1 **Messa a punto dei contenuti dell'attività di consulenza e predisposizione dell'allegato tecnico**
- 

ATTIVITA' ELEMENTARE 3.6.2

- 1 **Analisi preliminare sulle aree test**
- 

1 **3.6.2.A Inquadramento geologico e strutturale**

11 **3.6.2.B Sopralluoghi e inquadramento litologico e geomorfologico di dettaglio**

61 **3.6.2.C Analisi tramite PS**

ATTIVITA' ELEMENTARE 3.6.3

- 70 **Campagne di acquisizione dati**
- 

ATTIVITA' ELEMENTARE 3.6.4

- 85 **Ottimizzazione hardware sistema GB-InSAR**
- 

ATTIVITA' ELEMENTARE 3.6.5

- 88 **Sviluppo di software di processing e post-processing**
-

ATTIVITA' ELEMENTARE 3.6.6

92

## **Valutazione automatica dell'instabilità e validazione**

---

*Riferimenti bibliografici*

## ATTIVITÀ ELEMENTARE 3.6.1

### Messa a punto dei contenuti dell'attività di consulenza e predisposizione dell'allegato tecnico

L'esito di questa attività è culminato nella realizzazione del documento che descrive i modi ed i tempi in cui il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze (DST-UNIFI) si inserisce nel quadro delle attività del PON da parte dei *partner*. Tale documento, a cui si fa riferimento, è già a disposizione dell'Università della Calabria denominato ed ha per titolo "Sistemi di monitoraggio radar da terra (GB-InSAR) nell'ambito del progetto 'Sistemi integrati per il monitoraggio, l'*early warning* e la mitigazione del rischio idrogeologico lungo le grandi vie di comunicazione' - Convenzione Università della Calabria – Dipartimento di Scienze della Terra - Allegato Tecnico".

## ATTIVITÀ ELEMENTARE 3.6.2

### Analisi preliminare sulle aree test

#### 3.6.2.A INQUADRAMENTO GEOLOGICO E STRUTTURALE

---

Le tre aree di studio si collocano in Italia meridionale ed in particolare su tre TAS (tratti autostradali):

- il TAS A16 Candela-Lacedonia al confine tra Regione Puglia e Regione Campania;
- il TAS A3 Cosenza-Altilia in Calabria centro-settentrionale;
- il TAS A18 Messina Sud-Roccalumera, in Sicilia nord-orientale.

Inizialmente il progetto prevedeva il tratto autostradale Patti-Brolo sulla A20. Tuttavia, data la scarsità di fenomeni franosi insistenti sulle infrastrutture autostradali in quest'area, come verificato nei sopralluoghi effettuati, esso è stato sostituito dal TAS sulla A18.

Da un punto di vista geologico le tre aree sopra elencate ricadono nel complesso sistema orogenico Appennino Meridionale - Arco Calabro, originatosi

ad opera dei movimenti relativi Africa-Europa che hanno avuto inizio a partire dal Cretaceo superiore. Tale processo è stato fortemente condizionato dalle caratteristiche crostali dei domini paleogeografici mesozoici (Finetti *et al.*, 1996).

Il sistema Appennino Meridionale - Arco Calabro, si inquadra nel più ampio contesto del Mediterraneo Centrale come parte della Catena Appenninico-Maghrebide, un complesso puzzle strutturale derivante dall'evoluzione tettonica polifasica legata alla convergenza, durante il Terziario, tra Africa ed Europa. I diversi stadi collisionali che hanno dato origine all'attuale assetto dell'area sono stati caratterizzati dalla coesistenza di processi compressivi lungo il fronte orogenico e di fenomeni estensionali nelle aree di retrocatena (Finetti & Del Ben, 1986; Malinverno & Ryan, 1986; Dewey *et al.*, 1989; Patacca *et al.*, 1990). La curvatura oroclinica che interessa la fascia orogenetica e con apice in corrispondenza dell'Arco Calabro-Peloritano, settore più avanzato dell'orogene e con al retro l'ampio Bacino Tirrenico, a crosta parzialmente oceanizzata, è imputabile al susseguirsi delle suddette fasi collisionali (Finetti *et al.*, 1996).

All'interno di questo elaborato vengono descritti i principali stadi evolutivi della storia geologica di quei settori della catena in cui ricadono le aree d'interesse, in particolare l'Appennino Meridionale e l'Arco Calabro-Peloritano.

### *Appennino Meridionale*

La catena appenninica è costituita da due grandi strutture arcuate (Figura 1): l'arco settentrionale e l'arco meridionale. Entrambe, a loro volta, sono costituite da archi minori che si differenziano per estensione e curvatura. In particolare, nell'Appennino Meridionale questi archi sono caratterizzati da un trend NW-SE (Vai, 2001; Elter *et al.*, 2003; Parotto & Pratlun, 2004).

L'Appennino Meridionale è un segmento della catena appenninica che si estende dalla Campania fino alla Calabria settentrionale, più in particolare tra il lineamento Ancona-Anzio a nord e la linea di Sangineto a sud. Esso costituisce una catena a pieghe e *thrust* NE-vergente risultato della convergenza, a partire dal Cretaceo superiore, e la conseguente collisione continentale tra la placca europea e quella apulo-africana, avvenuta tra il Miocene ed il Pleistocene inferiore.

Nell'arco meridionale si distinguono essenzialmente quattro grandi elementi geologici (Patacca & Scandone, 2007 e riferimenti interni) sviluppatasi essenzialmente ad opera delle fasi tettoniche mioceniche e plio-quadernarie, che hanno modificato il precedente quadro paleogeografico mesozoico costituito da

fasce deposizionali, piattaforme e bacini distribuiti parallelamente al margine continentale. Questi sono:

- Area Tirrenica, caratterizzata da crosta oceanica e crosta continentale assottigliata, tipica del bacino di retroarco del sistema appenninico, formatosi a partire dal tardo Tortoniano.
- Area di Catena, caratterizzata da successioni che costituivano il paleomargine africano, distinte in successioni di piattaforma carbonatica e di bacino, deformate e coinvolte nella strutturazione dell'edificio orogenico.
- Area di Avanfossa (Fossa Bradanica), caratterizzata da depositi plio-pleistocenici di avanfossa depositi all'interno della depressione sviluppatasi sul fronte della catena per subsidenza flessurale della litosfera della *Lower plate*.
- Area di Avampaese Apulo, caratterizzata da una successione rappresentata da evaporiti triassiche e sovrastanti calcari meso-cenozoici di piattaforma, stratigraficamente sovrapposta al basamento cristallino.

Tali elementi geologici, all'interno dell'edificio orogenico, sono organizzati in diverse unità tettono-stratigrafiche, definite da uno o da un gruppo di *thrust* caratterizzanti un'unica successione stratigrafica, riferita ad un determinato dominio paleogeografico, con determinate caratteristiche di sedimentazione e con una specifica evoluzione tettonica. Le singole unità tettono-stratigrafiche, a loro volta, sono costituite da diverse unità litostratigrafiche (Patacca & Scandone, 2007).

Molti autori, nel corso degli anni, hanno proposto vari tipi di ricostruzioni paleogeografiche per l'Appennino Meridionale (Ogniben, 1969; D'Argenio *et al.*, 1974; Ippolito *et al.*, 1975; Sgroso, 1986, 1988; Marsella *et al.*, 1992). Tra le più conosciute c'è quella proposta da Mostardini e Merlini (1986), la quale prevede, da ovest verso est, i seguenti domini: Bacino Tirrenico, Piattaforma Appenninica, Bacino Lagonegrese-Molisano, Piattaforma Apula Interna, Bacino Apulo e Piattaforma Apula Esterna (Figura 2). La ricostruzione paleogeografica più recente è di Patacca & Scandone (2007). Questa ricostruzione prevede un unico bacino lagonegrese - molisano ed un'unica piattaforma carbonatica Apula (Figura 4).

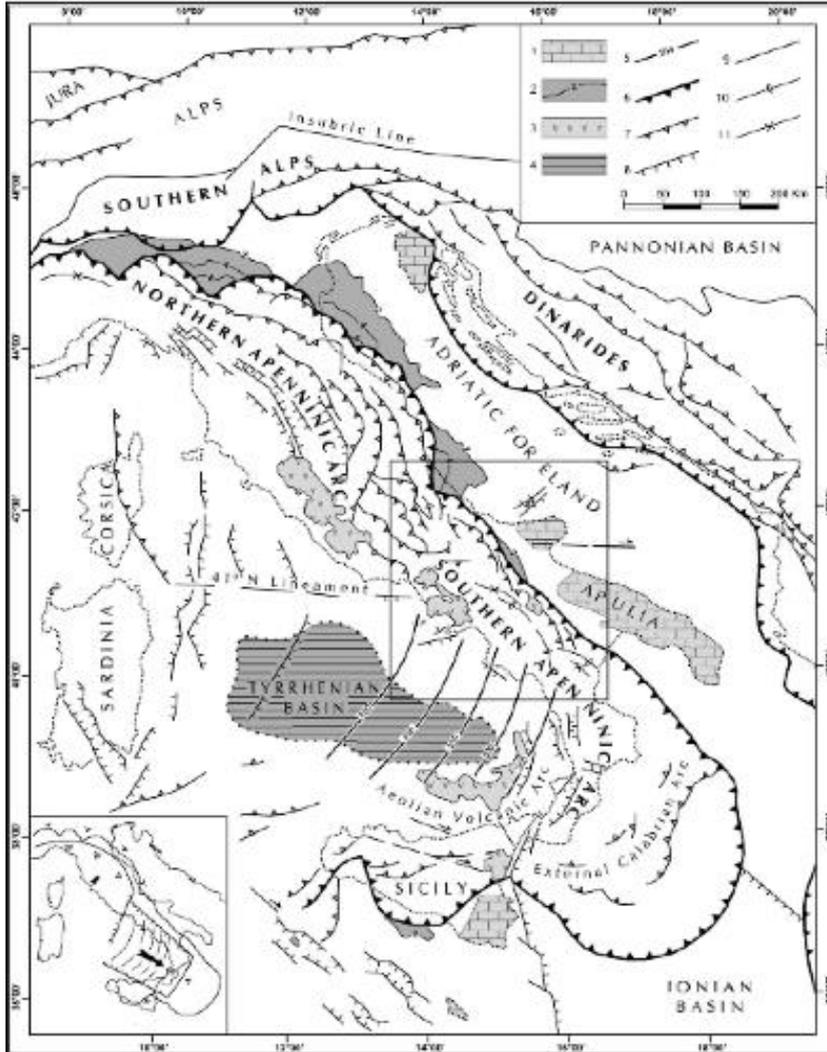


Figura 1. Schema geologico-strutturale della catena appenninica; nel riquadro l'arco meridionale (Patacca & Scandone, 2007).



## Catena

La catena sudappenninica è una porzione di orogene caratterizzata da una serie di unità tettoniche sovrapposte verso est a partire dall'Oligocene superiore (D'Argenio *et al.*, 1973; Mostardini & Merlini, 1986; Dazzaro *et al.*, 1988; Pescatore *et al.*, 2000). Le unità tettoniche (o unità stratigrafico-strutturali) derivano da successioni sedimentarie riferibili a contesti paleogeografici differenti, che deformate, accostate e sovrapposte tettonicamente durante differenti fasi orogenetiche, costituiscono in affioramento i rilievi montuosi dell'Appennino Meridionale (Patacca & Scandone, 2007).

L'evoluzione geodinamica della catena sudappenninica è stata condizionata dalla subduzione verso ovest della porzione sud-occidentale della Placca Adria e dalla presenza di strutture di svincolo che si sono sviluppate in direzione antiappenninica, suddividendo l'avampaese apulo in bassi ed alti strutturali (Ciaranfi *et al.*, 1983; Sella *et al.*, 1988; Pieri *et al.*, 1996; Doglioni *et al.*, 1994). In particolare lungo il Fiume Ofanto vi è una delle suddette strutture di importanza litosferica, identificabile con la linea del Vulture (Giannandrea *et al.*, 2004; 2006; Schiattarella *et al.*, 2005).

Nei Monti della Daunia i lineamenti tettonici più importanti sono rappresentati dalle strutture compressive che sovrappongono la catena al dominio di avanfossa plio-quadernaria (la più avanzata è sepolta e l'altra, leggermente più arretrata, è in corrispondenza del limite tra il fronte appenninico affiorante e la Fossa Bradanica) e da una struttura più arretrata grossomodo parallela al fronte della catena che mette a contatto le due principali unità tettoniche affioranti nell'Appennino Dauno (l'unità del Fortore e l'unità della Daunia; D'Azzaro *et al.*, 1988). Per quanto riguarda i depositi che costituiscono il substrato, quelli più antichi, a prevalente componente argillosa e in generale assetto caotico, vengono riferiti essenzialmente a due unità stratigrafiche: il Gruppo delle Argille Variegate e il *Flysch* Rosso entrambe di età Cretacico - Miocene inferiore. Su queste unità, riferibili ad un ambiente di mare profondo di margine passivo, poggiano le unità torbiditiche dell'avanfossa miocenica sudappenninica che da un punto di vista stratigrafico sono riconducibili essenzialmente al *Flysch* Numidico, al *Flysch* di San Bartolomeo, al *Flysch* di Faeto e alle Marne argillose del Toppo Capuana (Crostellà & Vezzani, 1964). Su queste unità poggiano in discontinuità depositi messiniani (Argilliti policrome del Calaggio; Molasse di Anzano; tripoli; Evaporiti del M. Castello; Arenarie di Deliceto) e del Pliocene;

questi ultimi sono rappresentati da depositi di *wedge-top basin*, raggruppati nel supersintema di Ariano Irpino (Ciaranfi *et al.*, 2011).

### *Avanfossa*

La Fossa Bradanica costituisce il dominio di avanfossa appenninica che si è originato dopo il Messiniano e che è ancora in via di evoluzione nel Mare Adriatico e nello Ionio (Migliorini, 1937; Selli, 1962).

Il bacino di avanfossa si è impostato sull'avampaese apulo (ribassato verso ovest da una serie di faglie dirette) e in parte sulle porzioni frontali dell'Appennino; tale bacino, quindi, risulta limitato ad W dal Sub-appennino Dauno e ad E dal Gargano ed è stato alimentato essenzialmente da sedimenti di natura terrigena provenienti dall'area di catena durante tutto il Plio-Pleistocene (Ciaranfi *et al.*, 1979; Casnedi, 1988; Pieri *et al.*, 1996; Tropeano *et al.*, 2002).

Tali sedimenti formano una successione che supera i 2000 m, ma di cui affiorano solo poche centinaia di metri. La porzione inferiore della successione bradanica affiora nell'area orientale del Tavoliere, al confine con il dominio di avanfossa, ed è caratterizzata da depositi costieri carbonatici (Calcarenite di Gravina) che passano verso l'alto e lateralmente ad una spessa successione siltoso-argilloso-sabbiosa (argille subappennine – già denominate nell'area di interesse "Formazione dell'Ofanto" da Crostella & Vezzani, 1964). La porzione superiore della stessa successione si osserva in tutta la restante parte del tavoliere ed è caratterizzata generalmente dalla presenza di superfici di discontinuità, di estensione regionale, modellate sulle argille subappennine e che segnano il passaggio a depositi quaternari (continentali o marini) terrazzati (Gallicchio *et al.*, 2002; Moretti *et al.*, 2010); solo localmente possono trovarsi situazioni in cui le argille subappennine passano verso l'alto a depositi regressivi sabbioso-conglomeratici non terrazzati (Ciaranfi *et al.*, 2011), come descritto nelle classiche aree della Fossa Bradanica (Ciaranfi *et al.*, 1979; Ciaranfi *et al.*, 1988; Pieri *et al.*, 1996; Tropeano *et al.*, 2002)

Dai suddetti caratteri stratigrafici si ricava che la Fossa Bradanica è caratterizzata nel Plio-Quaternario da due distinte fasi di evoluzione geodinamica: 1) una marcata subsidenza (circa 1 mm/anno nel Pliocene - Pleistocene inferiore) connessa alla subduzione appenninica e 2) un sollevamento (circa 0,5 mm/anno che comincia alla fine del Pleistocene inferiore e si esplica nel Pleistocene medio-superiore). Quest'ultimo fenomeno è stato interpretato in due differenti modi in letteratura: come aggiustamento isostatico

post-orogenico (Ricchetti *et al.*, 1988), oppure come *buckling* dell'avampaese per resistenza alla subduzione (Doglioni *et al.*, 1994).

### *Avampaese*

A scala regionale l'Avampaese apulo risulta dislocato da faglie a prevalente orientazione NW-SE che ne determinano tramite un sistema a gradinata la sommersione sia verso l'Adriatico, ad est, che al di sotto dell'Appennino, ad ovest; inoltre, strutture orientate grossomodo in direzione E-W lo suddividono in tre domini morfostrutturali rappresentati dal Promontorio del Gargano, dall'Altopiano delle Murge e dalle Serre Salentine. In particolare nella provincia di Foggia è rappresentato da un esteso promontorio carsico costituito da rocce calcaree giurassico-cretaciche la cui successione, spesso alcuni chilometri, è la testimonianza dell'evoluzione di un'ampia piattaforma carbonatica tetidea attiva fino alla fine del Cretacico (Piattaforma Apula, D'Argenio *et al.*, 1973; Ricchetti, 1975; Ciaranfi *et al.*, 1988). Dall'analisi dei dati di letteratura emerge un quadro della distribuzione delle facies alquanto omogeneo; la successione mesozoica presenta da W verso E facies di piattaforma carbonatica deposte in ambienti che passano dalla retroscogliera all'avanscogliera fino alle aree pelagiche ed emipelagiche di bacino.

Il quadro lito e cronostratigrafico risulta, invece, alquanto complesso e spesso contraddittorio; questo viene semplificato notevolmente da Spalluto *et al.* (2005) che presentano una situazione stratigrafica molto simile a quella classica riconosciuta per le Murge; tali autori, infatti, accorpano le unità di piattaforma interna in due sole formazioni separate da un paleosuolo bauxitico.

In discordanza sulle unità mesozoiche poggiano formazioni carbonatiche in facies di margine e di scarpata dell'Eocene e formazioni carbonatiche in facies di piattaforma aperta del Miocene e del Pliocene (D'Alessandro *et al.*, 1979; Casolari *et al.*, 2000; Spalluto & Pieri, 2008).

Il Gargano è delimitato, lungo i settori occidentale e meridionale, da scarpate di faglia acclivi che hanno sollevato il promontorio di circa 400-500 metri rispetto all'adiacente settore del Tavoliere di Puglia.

La struttura tettonica principale del Gargano è la faglia di Mattinata che attraversa da est ad ovest l'intero promontorio separandolo in due settori tra cui è interposta una valle stretta ed allungata (Valle Carbonara). La faglia di Mattinata ha registrato un'attività cinematica polifasica prevalentemente trascorrente ed ha determinato l'attuale assetto strutturale del Gargano e delle aree limitrofe. Il

sistema di faglie associato alla faglia di Mattinata è ritenuto tutt'ora attivo e sismogenetico.

L'arcipelago delle Isole Tremiti costituisce un lembo isolato della Piattaforma Apula. Dal punto di vista geologico le Tremiti sono formate da più unità marine terziarie delimitate da superfici di discontinuità stratigrafica e deposte in condizioni ambientali molto diverse variabili dalle aree di margine di piattaforma alle aree di scarpata/bacino (Cremonini *et al.*, 1971).

Su queste unità poggiano in discordanza esigui lembi di depositi continentali del Quaternario.

#### *Arco Calabro-Peloritano*

L'Arco Calabro-Peloritano si estende dalla Calabria centro-settentrionale alla Sicilia nord-orientale. Esso è il tratto della catena che raccorda l'Appennino Meridionale, allungato in senso NW-SE, con le Maghrebidi siciliane disposte E-W. Con i suoi terreni cristallini e metamorfici, in opposizione ai terreni sedimentari dell'Appennino Meridionale e della Sicilia, rappresenta da lungo tempo uno dei problemi geologici più studiati del Mediterraneo centrale, chiave per la comprensione dei rapporti tra Africa ed Europa. Tale catena, infatti, si colloca dal punto di vista geodinamico in prossimità del margine tra la placca eurasiatica e quella africana.

Abitualmente la catena viene considerata delimitata da due allineamenti tettonici: la linea di Sanginetto a nord e la linea di Taormina a sud. Questi due lineamenti trascorrenti, rispettivamente sinistro e destro, hanno svolto la loro attività fino al Tortoniano superiore (Amodio-Morelli *et al.*, 1976).

L'Arco Calabro-Peloritano è costituito essenzialmente da due edifici sovrapposti che disegnano una geometria a duplex derivante dall'accavallamento della Catena Kabilo-Calabride sulle unità della Catena Appenninico-Maghrebide. Il fronte di sovrapposizione dei due edifici si trova sommerso lungo il bordo ionico e affiora in Sicilia nord-orientale, alla base del versante meridionale dei monti Peloritani (Amodio-Morelli *et al.*, 1976).

Nel tratto siciliano l'analisi dei rapporti giacitureali delle coperture terrigene sintardorogeniche lungo questo fronte di accavallamento consente di riferire il ricoprimento delle Unità Kabilo-Calabride su quelle Appenninico-Maghrebide ad un intervallo compreso tra l'Oligocene inferiore e il Burdigaliano inferiore-medio (Lentini *et al.*, 1995).

Le falde di basamento Kabilo-Calabride, con le loro metamorfite di età ercinica, sono associate, in Calabria settentrionale, ad unità ofiolitifere. Nel loro complesso queste unità sono state interpretate come i resti di una catena eo-meso-alpina Europea vergente, che, saldatasi al margine africano, si è successivamente accavallata con vergenza opposta sul dominio appenninico-maghrebide (Haccard *et al.*, 1972; Amodio-Morelli *et al.*, 1976).

Nel tratto peloritano dell'arco, del tutto privo di unità ofiolitifere, sono comunque riconoscibili solo gli effetti della tettonica paleogenico-neogenica a vergenza africana, mentre non sono riconoscibili fasi alpine precedenti.

Le unità del dominio appenninico-maghrebide sono in parte sepolte sotto l'edificio Kabilo-Calabride e costituiscono il substrato del bordo ionico lungo l'arco esterno, dove formano un cuneo di accrezione a scaglie embricate, in cui sono coinvolti terreni sempre più recenti scollati lungo orizzonti via via più superficiali verso le aree frontali.

Il sistema a *thrust* Esterno, in questo tratto d'orogene, non mostra soluzioni di continuità con il sistema a *thrust* appenninico-maghrebide ed è costituito da unità ioniche, identiche alle successioni lagonegresi, fino alle aree frontali.

Gli effetti della tettonica post-tortoniana hanno prodotto, contestualmente alle strutture compressive lungo il bordo ionico, sistemi di faglie prevalentemente distensive sul bordo tirrenico (Finetti & Del Ben, 1986) e nell'immediato entroterra calabro (Sistemi del Crati, di Cittanova, di S. Eufemia, di Reggio Calabria di Monaco & Tortorici, 1995). Il bacino di Paola, delimitato dalle faglie trascorrenti di Palinuro e Catanzaro, è costituito da un *trough* prodottosi per avanzamento verso est del blocco della Sila (Finetti & Del Ben, 1986). Queste faglie distensive sono chiaramente legate all'apertura tirrenica e costituiscono gli elementi strutturali che, combinati con i sovrascorrimenti, sono responsabili della sismicità superficiale della Calabria.

Cinematicamente tali strutture sono comunque connesse anche con la migrazione al fronte dei *thrust*. La ridotta attività sismica del bordo ionico non va interpretata come stasi dei processi tettonici lungo il fronte di compressione, ma va messa in relazione alla natura plastica dei terreni coinvolti ed alla pellicolarità dei livelli di scollamento attualmente attivi al fronte. Lungo l'Arco Calabro esterno vi sono chiare evidenze di strutture compressive che deformano i terreni più recenti con dislocazioni (Finetti *et al.*, 1996).

### 3.6.2.B SOPRALLUOGHI E INQUADRAMENTO LITOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DI DETTAGLIO

---

Ai fini del progetto è importante verificare la tipologia di terreni affioranti nell'intorno delle aree d'interesse, le loro condizioni giacitureali, il contesto strutturale, nonché le condizioni geomorfologiche e di alterazione. Queste informazioni sono di fondamentale importanza per valutare le condizioni di stabilità dei pendii e ci consentono di identificare le zone a maggiore rischio e quindi maggiormente idonee al monitoraggio.

È inoltre opportuno ottenere informazioni su eventuali fenomeni pregressi che abbiano interessato i tre tratti autostradali, in modo da facilitare la localizzazione dei punti maggiormente soggetti a franosità e ipotizzare il ripetersi di questi eventi nel futuro, allorché si ripresentino condizioni simili.

La cartografia geologica utilizzata è rappresentata dalla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000 per i territori della Puglia e Campania dove ricade il TAS della A3, dalla Carta Geologica della Calabria alla scala 1:25.000 per il TAS della A16, dalla Carta Geologica d'Italia alla Scala 1:50.000 per il TAS della A20.

Per quanto riguarda le carte di catalogazione delle frane, queste sono fornite dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM, 2012).

Sono state inoltre analizzate le carte relative ai Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) disponibili ed all'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI) al fine di fornire un quadro completo ed aggiornato della distribuzione dei fenomeni franosi.

#### *TAS A16 Lacedonia-Candela*

In questo caso la cartografia geologica a disposizione è in scala 1:100000 (Figura 5), fatto che consente solo un'analisi generale dei depositi affioranti nei punti dove si sviluppano i fenomeni franosi.

Il tratto dell'autostrada A16 compreso tra gli svincoli Lacedonia (AV) e Candela (FG) si estende per 17 km in direzione SO-NE, salvo un segmento di circa 3 km nei pressi di Candela allineato E-O. Questo tronco autostradale è l'unico, all'interno del progetto, a ricadere all'interno di due regioni, la Campania e la Puglia, anche se, dal punto di vista geomorfologico tutto il percorso rientra all'interno di uno stesso bacino fluviale, quello del Torrente Calaggio (Figura 6).

A valle di Candela, questo corso d'acqua si unisce con il Torrente San Gennaro e diventa il Torrente Carapelle, sfociando infine nel golfo di Manfredonia.

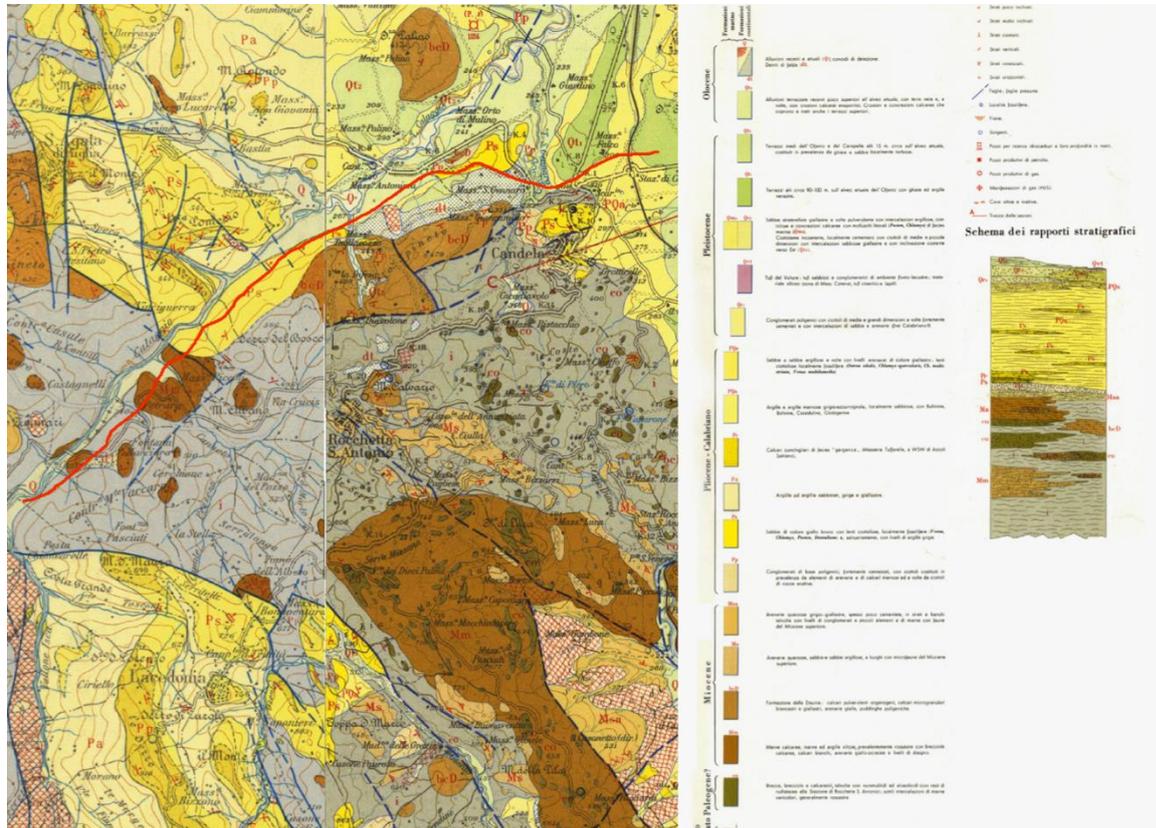


Figura 4. Carta Geologica d'Italia 1:100.000, contenente il tratto Lacedonia-Candela, e relativa legenda.

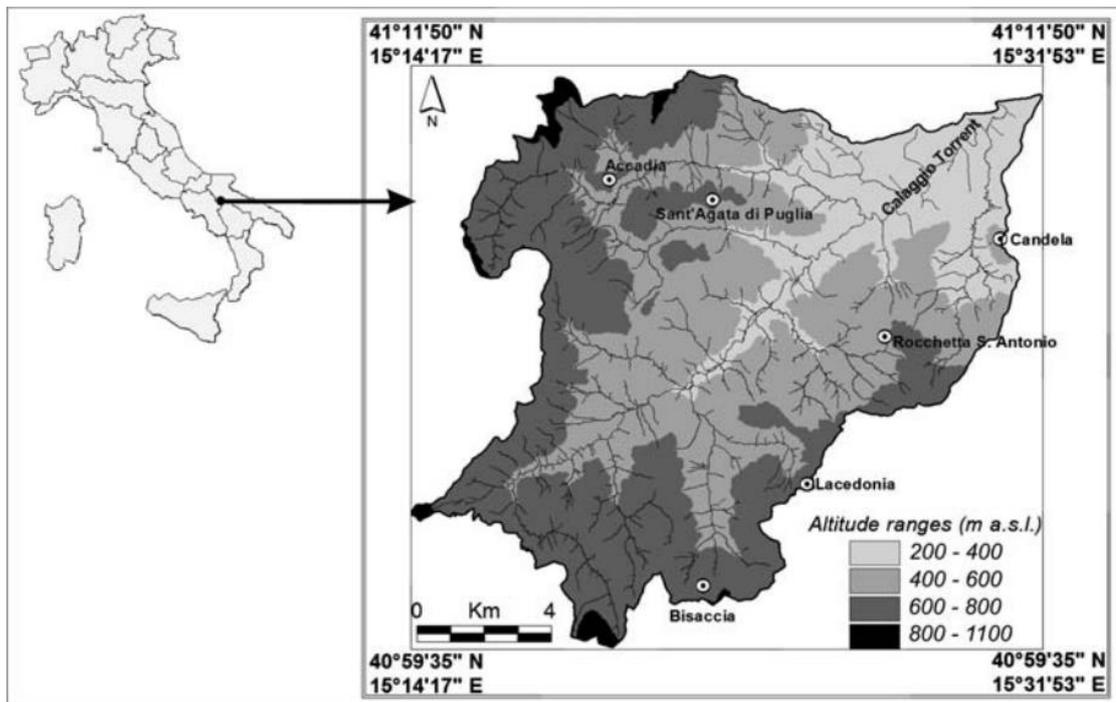


Figura 5. Modello digitale del terreno del bacino del Torrente Calaggio (Magliulo et al., 2008).

Il tratto di A16 di interesse fiancheggia la sponda in destra idrografica percorrendo il fondovalle da quota 400 m a quota 300 m circa. I rilievi che si trovano nelle prossimità sono modesti (inferiori ai 700 m) ma soprattutto sono caratterizzati da una bassa energia del rilievo. Le superfici sono leggermente ondulate perché sono costituite da materiale facilmente erodibile, come ghiaie poco cementate.

Sebbene in quest'area la tettonica sia ancora attiva, sulle forme del rilievo prevale il controllo della litologia, al punto che le forme di natura tettonica sono assenti o pesantemente rimodellate dall'erosione. Il fondovalle, all'altezza di Rocchetta S. Antonio fino al termine dell'area di studio, è interessato da terrazzi fluviali di origine deposizionale.

Le forme gravitative sono costituite da frane e da aree affette da soliflusso o *soil creep*. Evidenze di questi ultimi due fenomeni (alberi inclinati e lobi di soliflusso) sono particolarmente estesi sulla parte nord del bacino, mentre all'interno del tratto di interesse si limitano all'area nei pressi di Lacedonia (Figura 6).

In particolare il soliflusso interessa principalmente i versanti in cui affiorano complessi marnoso-calcarei o marnoso-argilloso-calcarei, mentre il *soil creep* è principalmente diffuso su complessi arenaceo-sabbiosi e sabbioso-ghiaioso-argillosi.

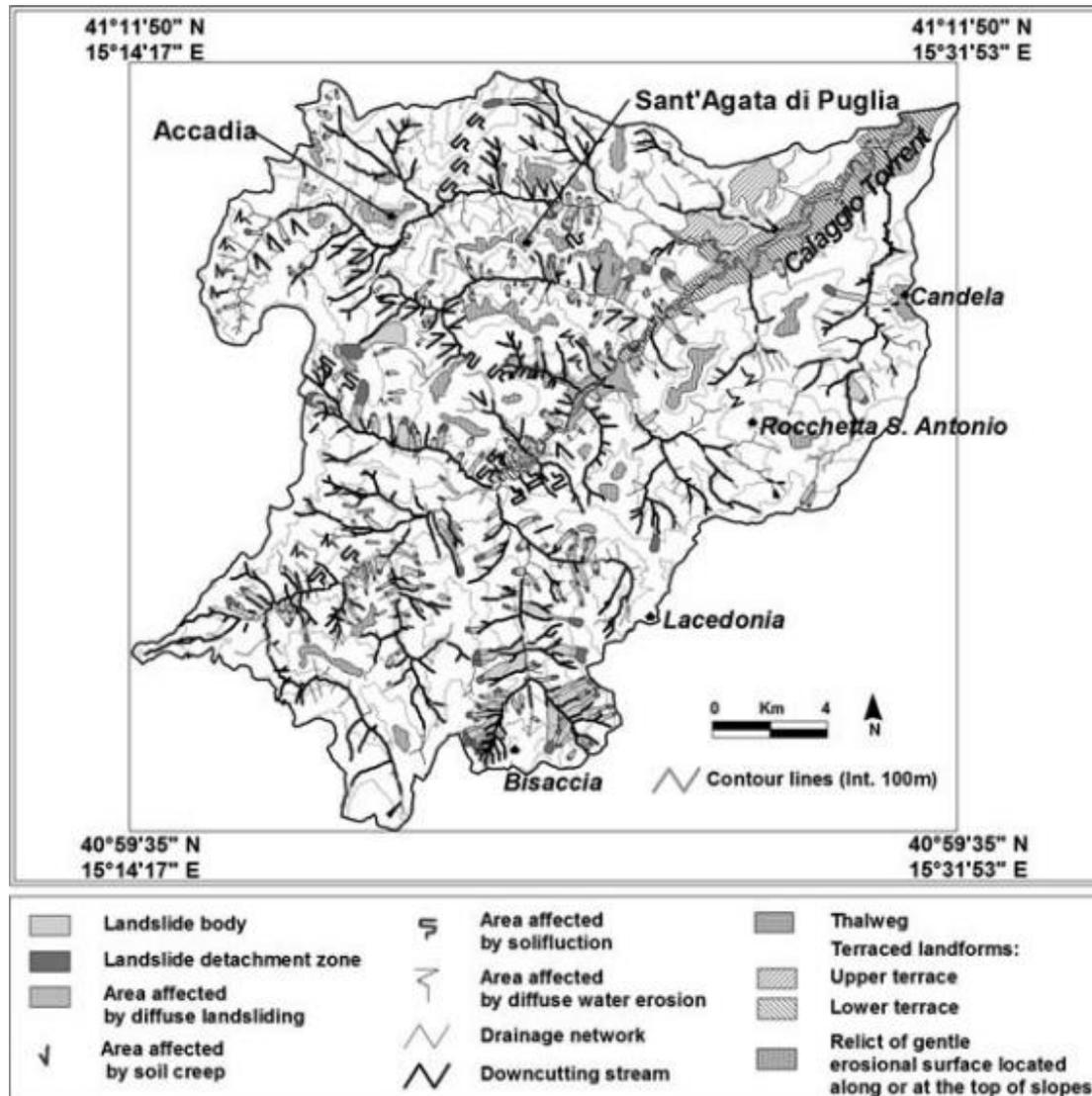


Figura 6. Mappa geomorfologica del bacino (da Magliulo et al., 2008).

Una visione generale delle frane cartografate nel PAI e nell'IFFI intorno al TAS di interesse è dato in Figura 7 mentre la legenda è riportata in Figura 8.

I principali dissesti che interessano il territorio attraversato dall'autostrada sono riconducibili a fenomeni gravitativi sviluppatasi nei terreni recenti argilloso-sabbiosi, come fenomeni di instabilità superficiale (deformazioni superficiali lente e dissesti per colamento, riferibili alla sola coltre argillosa) e fenomeni di instabilità profonda, riferiti alla scala del versante.

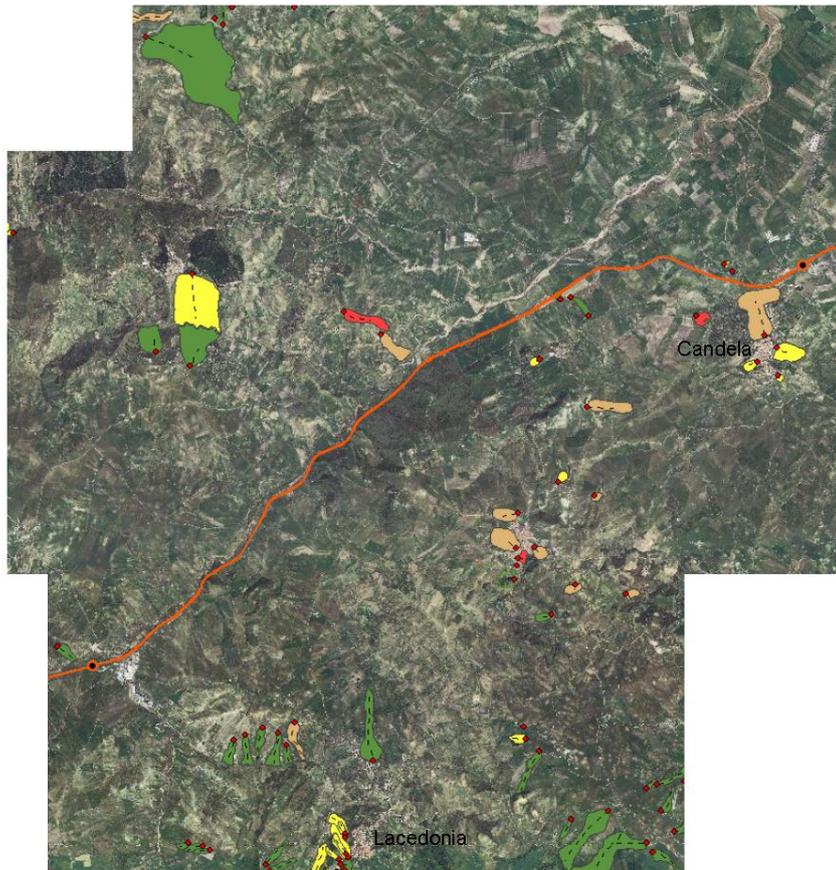
Tra questi, quelli che potrebbero rappresentare una minaccia per l'autostrada sono quelli localizzati sulla destra idrografica del Torrente Caleggio, in particolare quelli riportati in Figura 9.

Il primo è nelle vicinanze di Candela, dove si sviluppa una frana classificata come di tipo complesso che si imposta sui seguenti depositi Plio-Quaternari:

PQa: argille e argille marnose grigio azzurrognole, localmente sabbiose, con Bulimine, Bulivine, Cassiduline e Globigerine (Pliocene-Quaternario);

Qt3: alluvioni terrazzate recenti poco superiori all'alveo attuale, con terre nere e, a volte, con crostoni calcarei evaporitici (Olocene). Crostoni e concrezioni calcaree che coprono a tratti anche i terrazzi superiori.

Oltre a questa vi sono anche due colamenti lenti uno dei quali, di piccole dimensioni, sembra riguardare direttamente il TAS al km 122 circa e si imposta sui depositi Qt3 già descritti.



*Figura 7. Visione generale delle frane cartografate lungo il TAS (linea arancione) dallo svincolo di Lacedonia a quello di Candela (punti neri). La legenda è visibile in Figura 8.*

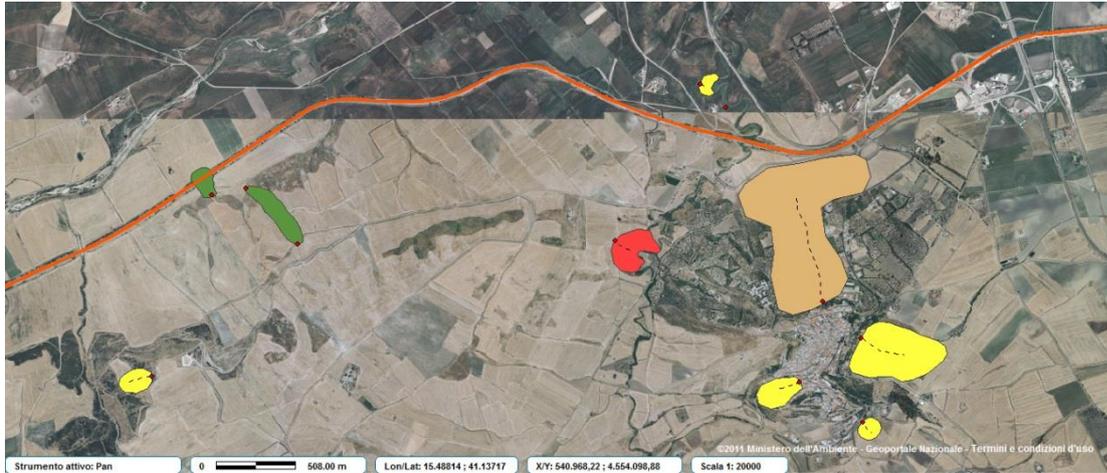
Pare evidente che le maggiori criticità si localizzino laddove le coperture plio-quadernarie, a dominante litologia argillosa, poggiano sul substrato litoide, che presenta caratteristiche estremamente diverse in termini geomeccanici.

Sono presenti anche altre frane, non cartografate negli inventari ufficiali, due delle quali sono rappresentate in Figura 10.

Si tratta di scivolamenti localizzati nella metà occidentale del tratto. Quello più a ovest, in località Alveo Vecchio, causò seri problemi alla mobilità quando, il 7 marzo 2005, si mobilitò a seguito di intense precipitazioni, causando la chiusura del tratto compreso tra Grottaminarda e Lacedonia fino al 16 marzo. Il problema è stato risolto mediante la costruzione di una variante.



Figura 8. Legenda dell'inventario delle frane.



*Figura 9. Dettaglio delle frane nei pressi dello svincolo di Candela (visibile all'estrema destra a NE del paese omonimo). La legenda è mostrata in Figura 8.*



*Figura 10. Dettaglio delle frane nei pressi dello svincolo di Lacedonia (visibile all'estrema sinistra). Le due frane indicate come scivolamenti (in giallo) sono state aggiunte sulla base degli studi condotti da Autostrade per l'Italia. La legenda è mostrata in Figura 8.*

Il tratto della A16 tra Lacedonia e Candela è stato oggetto di due sopralluoghi, tenutisi rispettivamente nei mesi di settembre ed ottobre. Il primo, effettuato del solo personale del DST-UNIFI, era mirato all'individuazione dei dissesti che possono interessare le infrastrutture viarie; il secondo aveva lo scopo di confrontare i risultati del primo con i dati in possesso di Autostrade Spa, il cui personale ha preso parte all'ispezione.

Il 7 marzo 2005 si è verificato nel tratto in oggetto un evento che ha causato ingenti danni ad un viadotto posto al km 122.1 (Figura 11). Tali da causarne l'inagibilità e da rendere necessaria la costruzione di una variante (Figura 12).

Da quanto è emerso in seguito al sopralluogo, il dissesto, che si verificò sotto forma di una colata in terra innescatasi dopo un periodo di piogge intense, non mostra attualmente segni di riattivazione e comunque la realizzazione della variante ha significativamente allontanato la sede stradale dal piede del versante. L'area è interessata anche da altri dissesti, principalmente colamenti e scivolamenti (Figura 13).

Il fenomeno in oggetto risulterebbe inoltre difficilmente monitorabile poiché in corrispondenza di esso il versante opposto non presenta punti panoramici fruibili per l'installazione dello strumento.



*Figura 11. Vista del viadotto danneggiato al km 122, località Alveo Vecchio. La foto è stata realizzata dalla nuova variante realizzata dopo l'evento del marzo 2005.*



*Figura 12. Settore compreso tra le progressive km 122.1 e km 123.6.*



*Figura 13. Nicchia di frana posta nella parte alta del settore in oggetto.*



*Figura 14. Colata in terra situata nella parte nord-orientale del settore posto tra i km 122.1 e 123.6.*

Sono stati tuttavia individuati altri fenomeni che possono interessare l'autostrada. In particolare possono essere identificate due aree, entrambe poste in destra idrografica del Torrente Caleggio, in cui i versanti sono interessati da numerosi dissesti. Si tratta di fenomeni franosi di modesta entità che tuttavia sono molto numerosi e ravvicinati tra loro e che interessano in maniera pervasiva i versanti sui quali insistono, caratteristiche che, considerata la relativa vicinanza alla sede stradale, li rendono di interesse per la sicurezza dell'autostrada.

Il primo dei due settori è posto tra il km 112.1 ed il km 112.8 della A16 (Figura 15, Figura 16), in prossimità dell'uscita est della Galleria Bagno, non distante dallo svincolo di Lacedonia. In quest'area il terreno è sottoposto piccoli scivolamenti rotazionali (Figura 17, Figura 18), fenomeni di soil creep (Figura 20) e colamenti superficiali diffusi (soliflussi). In corrispondenza delle nicchie di maggiori dimensioni il terreno presenta localmente fratture tensionali beanti con aperture che raggiungono anche i 20 cm e una persistenza laterale di 5-10 m. Le scarpate hanno altezza media di 2-5 m, diametro di 10-15 m e lunghezza fino a 20 m. Si tratta di fenomeni perlopiù in stato quiescente,

evidenziati dalla parziale copertura vegetale che interessa i corpi di frana, ma che sicuramente sono esposti ad una rapida riattivazione stagionale nei periodi umidi (Figura 19).

L'area è inoltre caratterizzata da fenomeni di erosione sia concentrata che diffusa. Il monitoraggio dell'intera area, la cui superficie è di circa 65 ha, risulta facilitato dalla scarsa copertura vegetale (il settore è interamente coltivato a seminativi) e dall'ottima visuale che si può ottenere posizionando lo strumento sul versante opposto, il quale risulta anch'esso sgombro da vegetazione e facilmente accessibile.



*Figura 15. Settore posto tra le progressive km 112.1 e km 112.8.*



*Figura 16. Panoramica, vista dal versante opposto, del settore compreso tra i km 112 e 113.*



*Figura 17. Corpo di frana stabilizzato e vegetato.*



*Figura 18. Corpo di frana con parziali indici di stabilizzazione e vegetazione.*



*Figura 19. Lobo di colata di dimensioni ridotte ma con evidenti segnali di attività recente.*



*Figura 20. Fenomeni di soil creep.*

Il secondo settore individuato è localizzato tra il km 114.2 e il km 115.0 della A16, in prossimità dell'uscita est della Galleria Montevaccaro (Figura 21, Figura 22).

L'area è anch'essa interessata da fenomeni franosi diffusi. Le tipologie prevalenti sono, anche in questo caso, scivolamenti rotazionali, colamenti superficiali e *soil creep* (Figura 23, Figura 24, Figura 25).

In corrispondenza degli scivolamenti maggiori si osservano nicchie ben evidenti con scarpate alte fino a 6 m, corpi di frana lunghi oltre 50 m e larghi oltre 10 m.

Alle spalle delle principali scarpate il terreno presenta fratture larghe localmente fino a 40 cm, profonde fino a 60 cm e con elevata persistenza laterale. Localmente si possono notare fenomeni di erosione diffusa o concentrata che interessano le scarpate o i corpi delle frane maggiori. Una delle frane di scivolamento maggiori tra quelle identificate risulta particolarmente influenzata da tali fenomeni di ruscellamento, al punto che il corpo franoso pare aver subito longitudinalmente un progressivo imbibimento ed una conseguente trasformazione in colata di terra (Figura 26).

Il corpo della colata, costituito da una matrice argillosa contenente numerosi frammenti litoidi eterometrici, si estende longitudinalmente per circa 70 m e trasversalmente per circa 4 m. A valle del corpo di colata si trova un corpo litoide di diametro di 4-5 m, il quale, da testimonianze raccolte sul posto, si sarebbe mobilizzato nel 2005. Data la natura di tali fenomeni, come per il settore precedentemente descritto, essi risultano al momento in stato di quiescenza, probabilmente legata alle scarse precipitazioni che hanno interessato l'area durante tutto il 2012. E' tuttavia ipotizzabile che un deciso aumento delle precipitazioni possa riattivare la gran parte di questi dissesti, rendendoli di interesse per poter garantire la sicurezza della sede stradale. Le condizioni di copertura vegetale, l'esposizione e la visibilità dal versante opposto sono anche in questo caso ottimali per il monitoraggio. Tuttavia, rispetto al settore descritto in precedenza, le distanze di questi dissesti dalla sede stradale sono generalmente maggiori.



*Figura 21. Settore compreso tra le progressive km 114.2 e km 115.*



*Figura 22. Panoramica del settore compreso tra i km 114.2 e 115, visto dal versante opposto.*



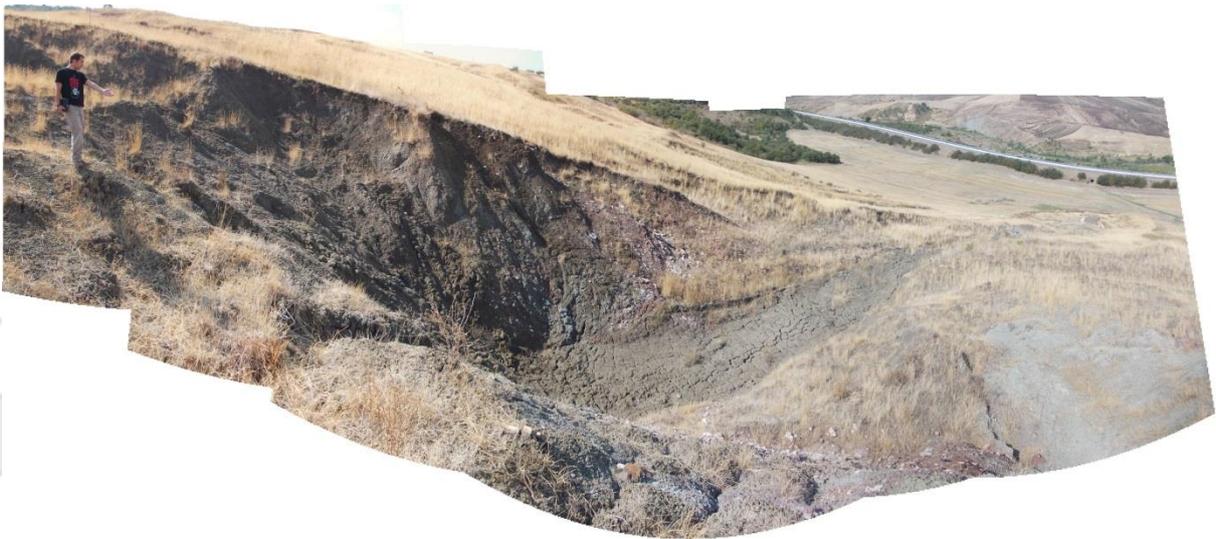
*Figura 23. Porzione occidentale del settore in oggetto. Sono evidenti numerose nicchie nella parte alta del versante.*



*Figura 24. Nicchia di distacco di medie dimensioni nella porzione occidentale del settore in oggetto.*



*Figura 25. Nicchia di distacco di medie dimensioni nella porzione centrale del settore in oggetto.*



*Figura 26. Fotomosaico del fenomeno franoso di maggior rilievo presente nel settore in oggetto. Si nota come la nicchia di distacco sia interessata da fenomeni di ruscellamento che concorrono alla trasformazione del corpo di frana in colata di detrito, la cui estensione longitudinale raggiunge i 70 m.*

Su segnalazione del personale di Autostrade Spa, durante il sopralluogo congiunto è stato inoltre visionato un ulteriore dissesto che, sebbene ricada 14 km al di fuori del TAS concordato Lacedonia-Candela, risulta di particolare rilevanza. Tale fenomeno franoso, situato sul versante esposto a sud al km 97.4 della A16 (Figura 27), è infatti attualmente monitorato da Autostrade Spa per mezzo di inclinometri e piezometri e mostra spostamenti massimi di circa 3 cm/mese. Il motivo di particolare rilevanza di questo dissesto è che la sede stradale attraversa il corpo di frana trasversalmente nella sua porzione medio-inferiore. La frana, lunga circa 400 m e larga 130 m, è classificabile come scivolamento con una superficie di scorrimento che, secondo i dati strumentali, si localizza a 18-20 m di profondità in prossimità della sede stradale (Figura 28).

Negli ultimi anni il dissesto ha causato problemi al manto stradale ed alle opere ad esso connesse (muretti perimetrali, canalette ecc.). Da un primo sopralluogo pare che tale fenomeno franoso sia facilmente monitorabile dal versante opposto, data la buona visibilità e la scarsa copertura vegetale, sebbene l'effettiva accessibilità dell'area su cui installare lo strumento debba essere ancora verificata. Date le dimensioni del dissesto, la sua stretta relazione con le opere viarie, il suo stato di attività, la disponibilità di dati strumentali pregressi e la fattibilità del monitoraggio si propone quindi di inserirlo nella lista dei potenziali casi di studio, sebbene esso non rientri nel tratto concordato in sede di approvazione del progetto.

Una sinossi riassuntiva dei fenomeni individuati in campagna e qui descritti è fornita in Tabella 1.



*Figura 27. Dissesto posto al km 97.4 della A16. La sede stradale attraversa il corpo di frana nella sua porzione medio-inferiore.*



*Figura 28. Dissesto posto al km 97.4 della A16. Sul terreno gli unici segni evidenti di movimento sono fratture sui muretti perimetrali, nelle canalette di scolo e dissesti al manto stradale.*

N°	Localizzazione/P rogressiva	Comune (Provincia)	Distanza del versante dalla sede autostradale	Descrizione dissesto	Foto
1	Versante nord tra il km 97.3 ed il km 97.5	Grottaminarda (AV)	la sede stradale attraversa il corpo di frana	Frana di scivolamento con superficie di scorrimento posta a 18-20 m di profondità. Lunghezza di circa 400 m, larghezza di circa 130 m.	Figura 27 Figura 28
2	Versante sud tra il km 112.1 ed il km 112.8 all'uscita est della galleria Bagno	Lacedonia (AV)	da un minimo di circa 30 m a circa 70 m	Piccole frane diffuse di scivolamento o colate; caratterizzate da nicchie recenti con piede abbastanza stabile e vegetato. Evidenti fratture in prossimità dei dissesti. Possibile riattivazione in caso dei abbondanti precipitazioni.	Figura 15 Figura 16 Figura 17 Figura 18 Figura 19 Figura 20
3	Versante sud tra il km 114.2 ed il km 115.0	Lacedonia (AV)	circa 100 m	Piccole frane diffuse di scivolamento o colate caratterizzate da nicchie ben visibili con scarpate alte fino a 6 m e corpi franosi che si estendono longitudinalmente per più di 50 m e trasversalmente anche al di sopra dei 10 m. I dissesti sono recenti e caratterizzati da profonde fratture aperte. Le colate presenti talora si impostano all'interno degli scivolamenti stessi.	Figura 21 Figura 22 Figura 23 Figura 24 Figura 25 Figura 26

4	Versante sud tra il km 122.1 ed il km 123.6	Tra Rocchetta di S. Antonio e Candela (FG)	tra circa 100 e 150 m	Frane diffuse, prevalentemente colate; caratterizzate da nicchie ben visibili e attive con piede vegetato e stabilizzato. Possibile riattivazione in caso di abbondanti precipitazioni.	Figura 11 Figura 12 Figura 13 Figura 14
---	---	--	-----------------------	---	--

Tabella 1. Schema riassuntivo delle principali frane individuate tramite il sopralluogo lungo il tratto Lacedonia-Candela della A16.

#### TAS A3 Altilia-Cosenza Sud

Il tratto dell'autostrada A3 che va da Altilia a Cosenza Sud è lungo 26.4 km approssimativamente in direzione S-N (Figura 29, Figura 30).

La metà settentrionale rientra all'interno del bacino del Crati, quella meridionale nel bacino del Savuto, con lo spartiacque posto nei pressi di Pian del Lago, che sorge su un altopiano.

A causa delle sue caratteristiche litologiche, strutturali, tettoniche, topografiche ed idrologiche, questo territorio è ben noto per essere affetto da numerosi dissesti, documentati già agli inizi del '900, che attualmente causano spesso problemi di viabilità lungo la A3. Un caso recente riguarda una frana che all'inizio del 2009 bloccò la stessa autostrada all'altezza dello svincolo di Santa Trada (RC) e che fu riaperta pochi giorni dopo, anche in seguito al monitoraggio GB-InSAR che certificò il rischio residuo come accettabile (Del Ventisette *et al.*, 2011).

All'interno del bacino del fiume Savuto l'autostrada fiancheggia il corso d'acqua lungo la sponda occidentale (destra idrografica), con alcuni brevi tratti in galleria; l'alveo risulta fortemente incassato ed i versanti (di cui il più alto è il monte S. Lucerna di 1256 m) possiedono un'elevata energia del rilievo. Infatti, la maggior parte delle frane si individua proprio all'interno di questo bacino nei pressi di Altilia (Viadotto di Grotta della Paglia 1 e Viadotto S. Ruiz, Figura 31) e di Belsito (Figura 32).

Si tratta di frane complesse e di scivolamento che si impostano su var litotipi. Questi sono, in successione da sud a nord:

M<sup>cl-s</sup><sub>2-3</sub>: conglomerati con grossi ciottoli, ben arrotondati, di rocce ignee e metamorfiche in una matrice sabbiosa, con occasionali lenti di sabbia. Questo complesso presenta una moderata resistenza all'erosione con permeabilità elevata.

sm: scisti e gneiss da grigio chiari a biancastri, costituiti prevalentemente da quarzo, feldspato e muscovite. Le rocce localmente fratturate e brecciate, presentano una resistenza all'erosione da media ad elevata.

Permeabilità bassa con aumento della stessa nelle zone di fatturazione;

sbg (Paleozoico): complesso igneo metamorfico costituito da paragneiss e scisti biotitici, spesso con granati visibili ad occhio nudo, associato a gneiss granitoidi e vene, o ammassi, di rocce granitiche senza granati. Sporadicamente si hanno zone di gneiss basici, anfibolici. Localmente si osservano corpi lenticolari, o intercalazioni di calcari cristallini e marmorei. Le rocce, in genere consistenti e resistenti all'erosione, sono talora profondamente degradate e quindi più facilmente disgregabili. Permeabilità generalmente bassa;

sf: scisti filladici grigi, costituiti prevalentemente da quarzo, muscovite e sericite e clorite; le rocce contengono generalmente vene, o segregazioni, di quarzo parallele alla scistosità. Questo complesso presenta una discreta resistenza all'erosione, localmente ridotta nelle zone di fatturazione ove si possono sviluppare frane, particolarmente quando la scistosità si presenta a franapoggio. Permeabilità bassa con aumento della stessa nelle zone di maggiore fatturazione.

Più a nord una sostanziale stabilità caratterizza l'altopiano di Pian del Lago. Nel tratto ancora più a settentrione, all'altezza di Donnici Superiore e Inferiore, l'autostrada corre lungo una cresta a monte del Torrente Albicello che scorre poco più ad est; a valle della A3 vi sono anche numerose frane di scivolamento e complesse. Queste si impostano sul complesso P<sup>cl</sup><sub>3</sub> costituito da conglomerati, da bruno a bruno-rossastri, con ciottoli ben arrotondati di rocce cristalline in matrice sabbiosa grossolana con locali intercalazioni di sabbia e ghiaia. Questi depositi sono probabilmente di origine continentale (del Calabriano) e generalmente sono ben costipati con una discreta resistenza all'erosione ed un'elevata permeabilità. Tuttavia, le frane in questione, essendo poste a valle della A3, non sembrano rappresentare una minaccia per l'autostrada a meno di arretramenti consistenti.

Continuando verso nord la A3 entra nuovamente in una valle incassata, quella del Torrente Iassa che gli scorre ad est. Poco dopo lo sdoppiamento delle due carreggiate autostradali ed il Viadotto Friddizza, fino a Laurignano, si riscontrano diverse frane di tipo complesso in corrispondenza dei Viadotti San Martino, Specola, Acqua Ceraso, Torre di Surice (Figura 33). Qui affiorano essenzialmente:

sbg: come sopra descritto;

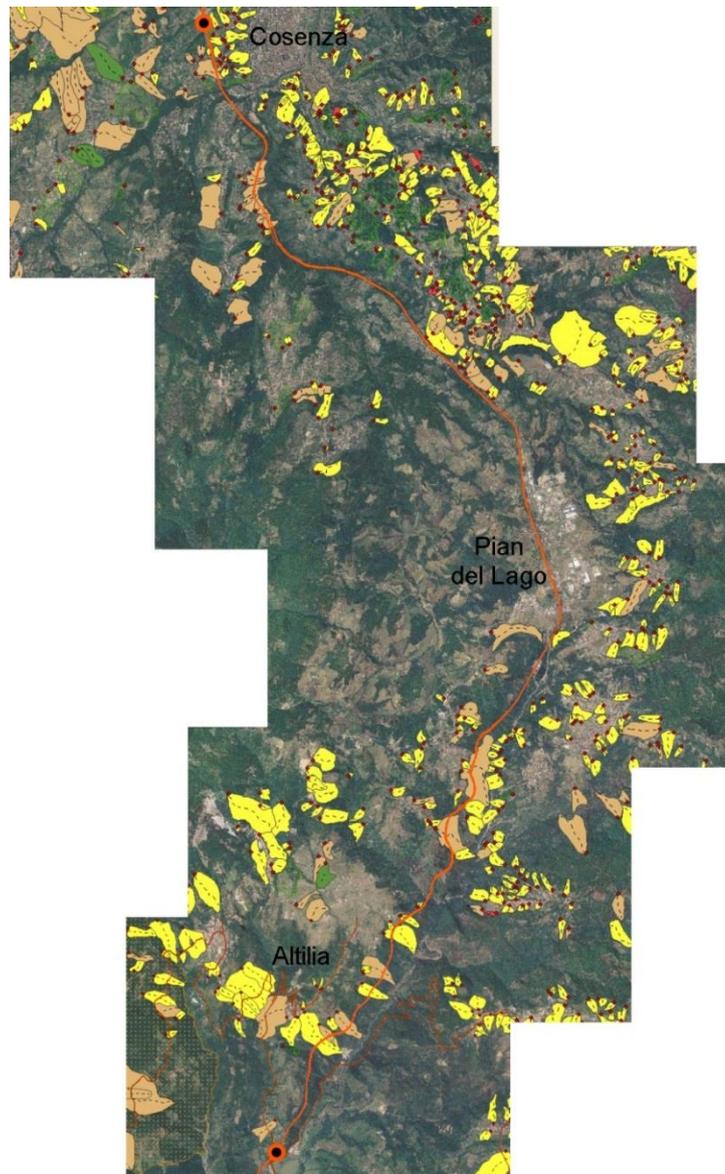
cc: calcari cristallini paleozoici.

Nel tratto terminale, dopo il Viadotto Busento, ad 1 km dallo svincolo di Cosenza Sud, ulteriori frane di scivolamento e complesse interessano l'autostrada (Figura 34). I litotipi affioranti sono:

$P^s_3$  (Calabriano): sabbie da fini a grossolane, con qualche intercalazione arenacea. Questo complesso presenta una moderata resistenza all'erosione ed elevata permeabilità;

$P^s_{2-3}$  (Pliocene medio): sabbie ed arenarie da bruno chiaro a biancastre, a grana da fine a grossolana. Questo complesso presenta scarsa resistenza all'erosione ed elevata permeabilità.





*Figura 30. Visione generale delle frane cartografate lungo il TAS (linea arancione) dallo svincolo di Altilia a quello di Cosenza sud (punti neri). La legenda è visibile in Figura 8.*

Il 25 gennaio 2009, in occasione della medesima ondata di maltempo che causò la frana di Santa Trada, si verificò una colata di fango rapida che causò la morte di due persone in prossimità dello svincolo di Rogliano. Nel marzo del 2010 altri eventi simili hanno colpito l'autostrada interessando ambedue le carreggiate.

Tuttavia, nonostante le frane presenti nel tratto di interesse dell'A3 siano numerose, la possibilità di monitorarle efficacemente tramite un sistema radar da terra dovrà essere valutata da ulteriori sopralluoghi. Infatti, fenomeni quali *debris flows* o scivolamenti superficiali di terra analoghi a quelli che sono avvenuti nel 2009, pur causando un serio pericolo per la vita umana e per l'infrastruttura, solitamente non fanno registrare spostamenti fino al collasso e pertanto non sono monitorabili che in un secondo momento al fine di verificarne la stabilità residua. Oltretutto dove è presente una fitta vegetazione boschiva risulta praticamente impossibile l'utilizzo del radar.

Una possibile ed interessante applicazione potrebbe risultare dal monitoraggio delle deformazioni dei viadotti (in particolare quello di S. Ruiz) che, come sottolineato dagli studi svolti dall'Università della Calabria, subiscono deformazioni causate da frane profonde. Vista la morfologia accidentata del territorio, un monitoraggio di questo tipo potrebbe essere svolto ubicando gli strumenti sulla sponda orientale del Torrente Savuto.

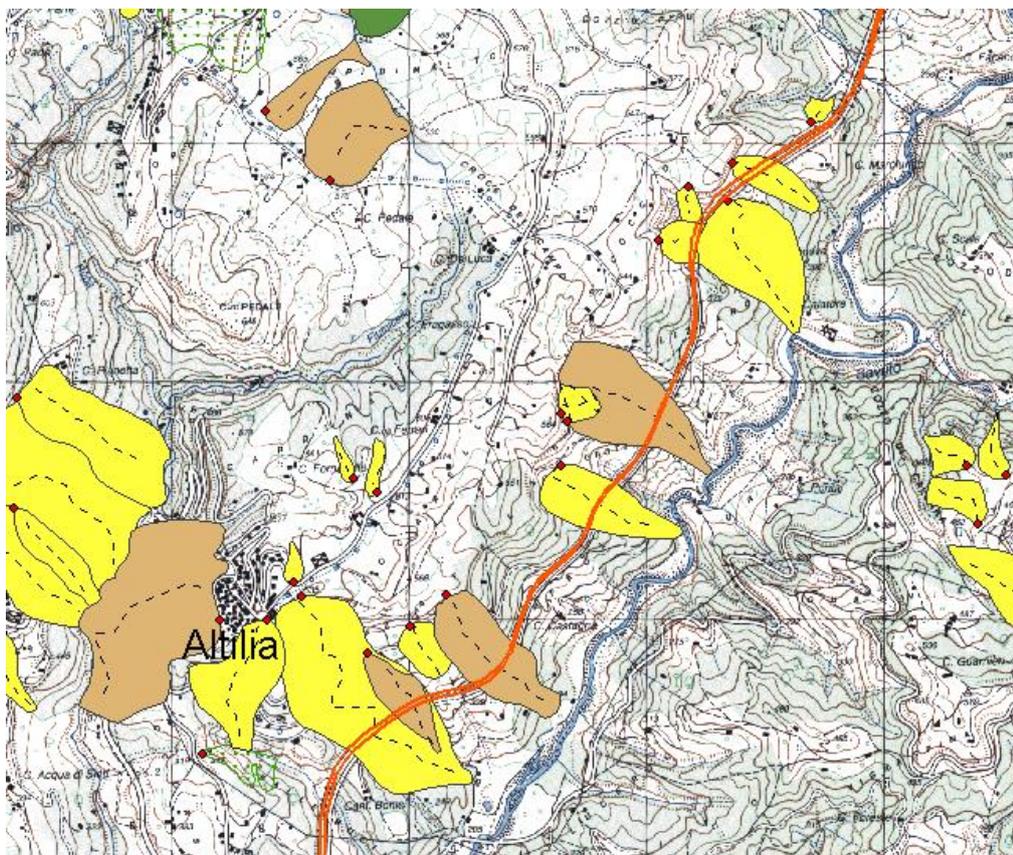


Figura 31. Dettaglio delle frane presso Altilia. La legenda è visibile in Figura 8.

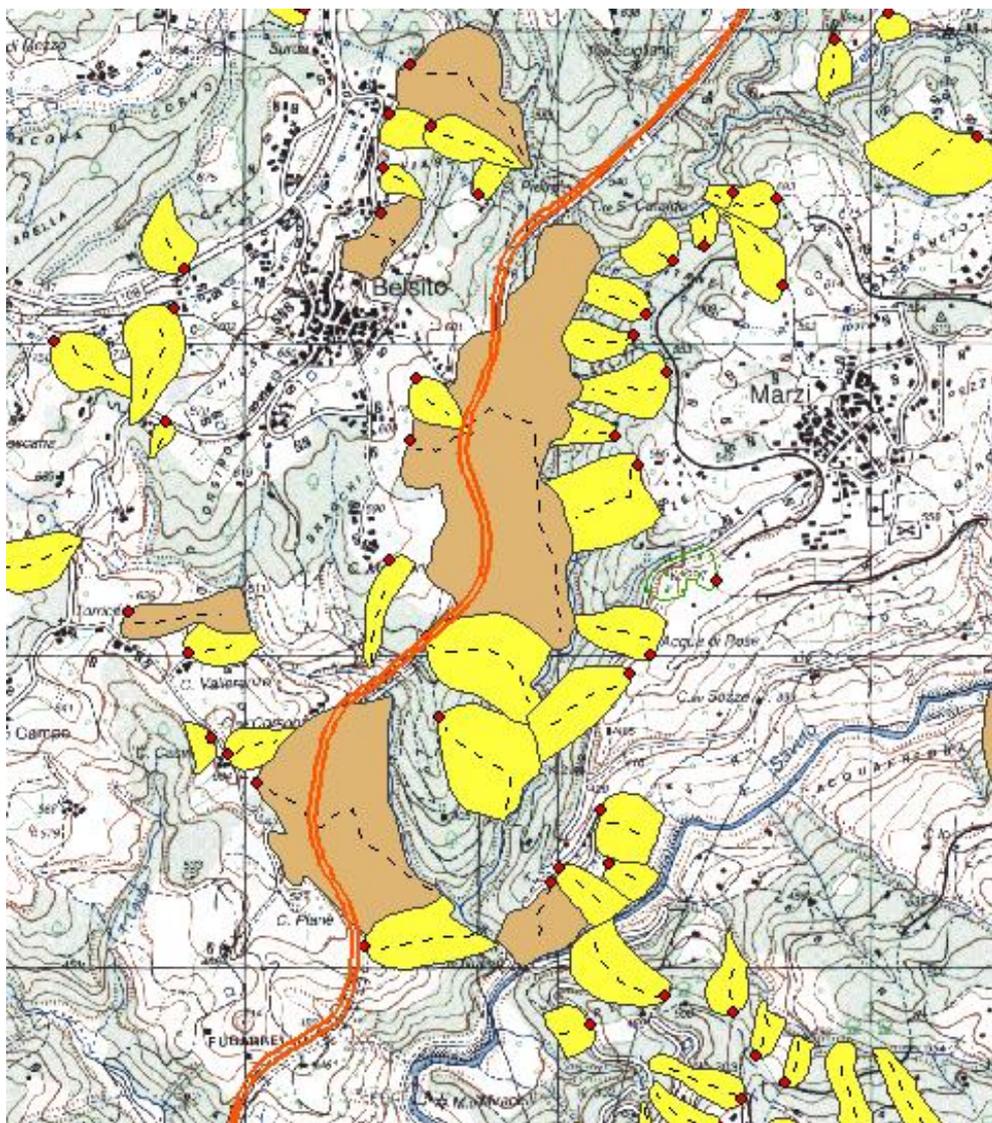


Figura 32. Dettaglio delle frane presso Belsito. La legenda è visibile in Figura 8.

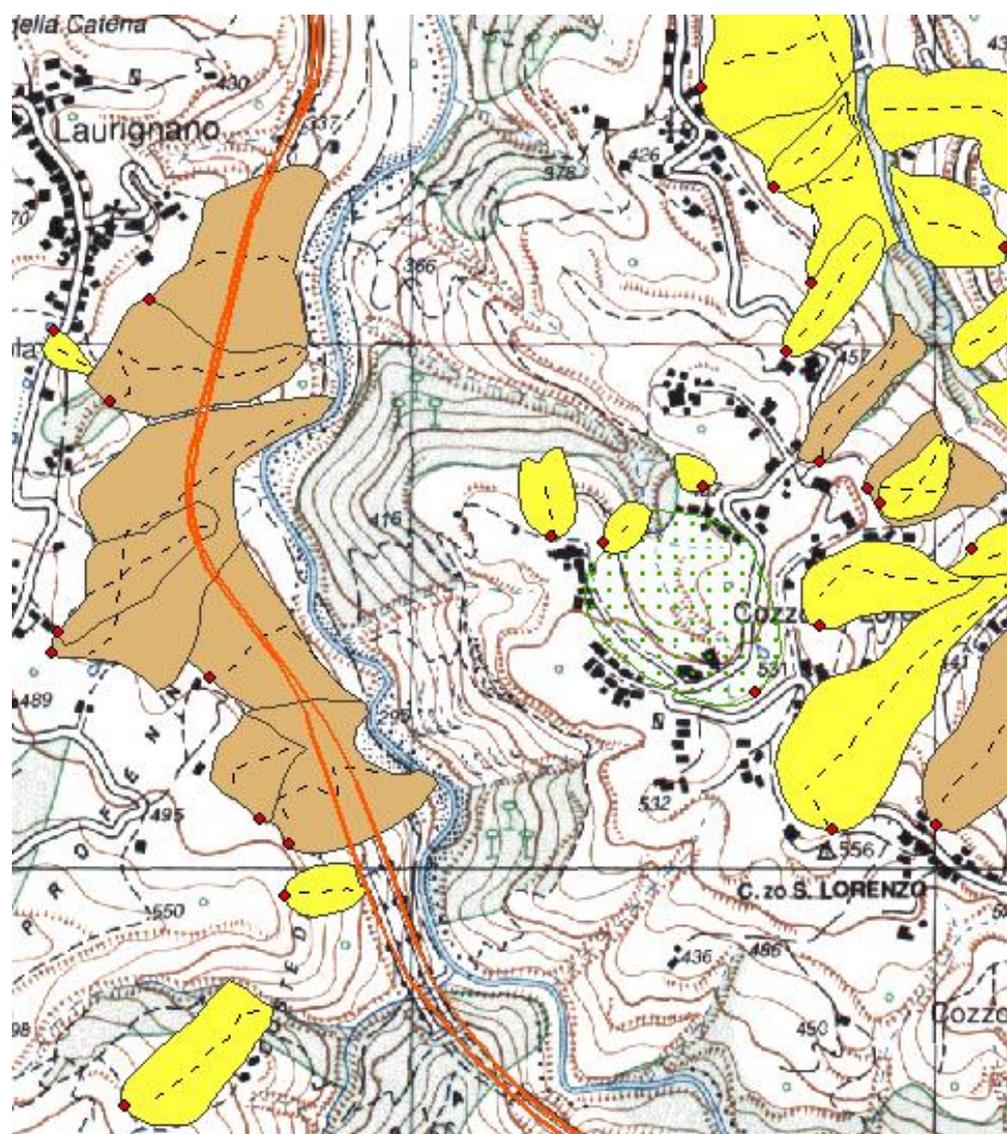


Figura 33. Dettaglio delle frane presso Laurignano. La legenda è visibile in Figura 8.

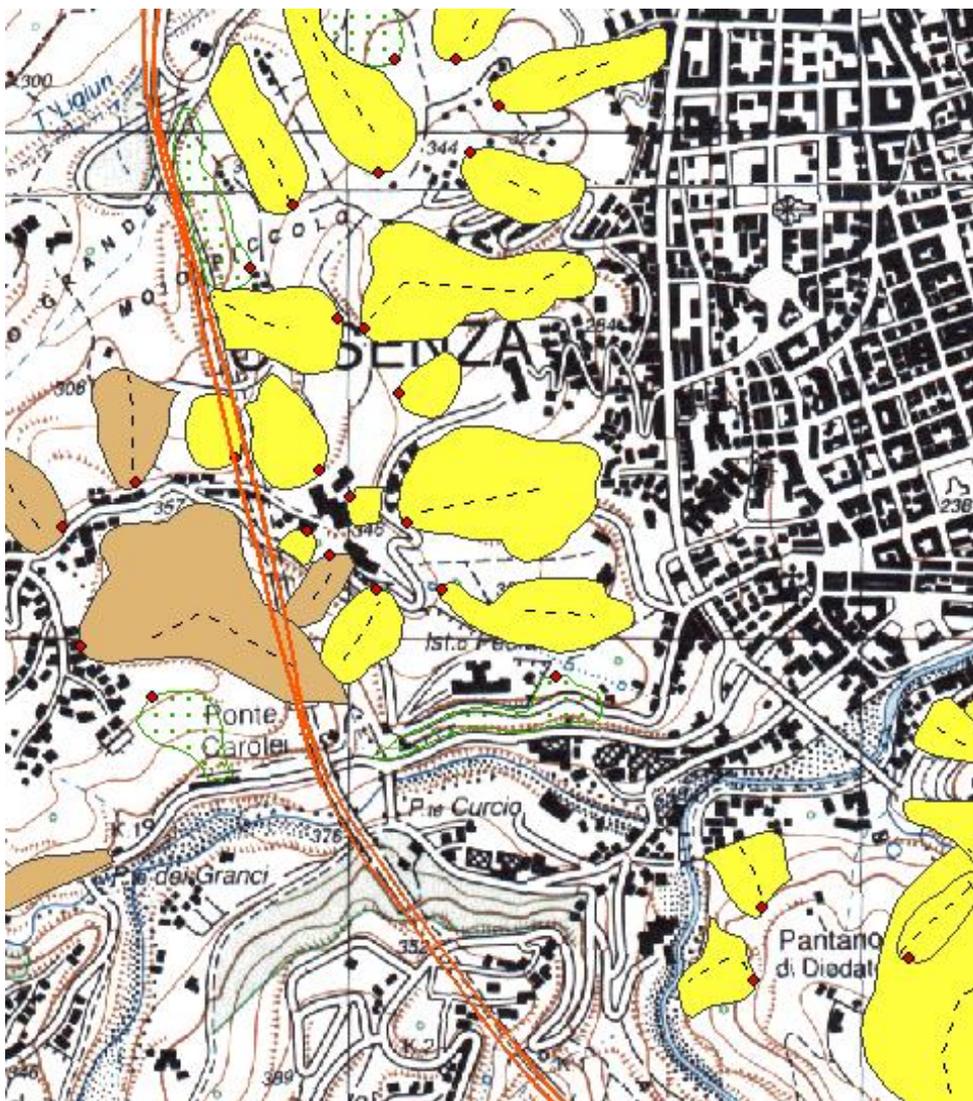


Figura 34. Dettaglio delle frane presso Cosenza. La legenda è visibile in Figura 8.

Nel mese di settembre è stato effettuato un sopralluogo per l'individuazione dei dissesti che minacciano la A3 nel tratto di interesse e per una valutazione preliminare della loro idoneità ai fini di un monitoraggio come quello necessario ai sensi del progetto. I fattori da considerare a tale scopo sono il rischio rappresentato dal dissesto (che dipende soprattutto dallo stato di attività della

frana e dalla sua distanza dall'autostrada in relazione alla propria tipologia) e la fattibilità di un monitoraggio interferometrico da terra, secondo le condizioni descritte precedentemente.

L'accertamento di campagna era anche mirato a verificare le condizioni di frane dedotte da fonti bibliografiche e cartografiche o comunque conosciute per aver recentemente causato danni o vittime lungo il tratto di interesse. Relativamente a quest'ultimo caso sono noti due eventi che hanno causato danni in questo TAS negli ultimi anni: la frana di Rogliano e quella di Donnici. Tuttavia dal sopralluogo non sono emersi segni di instabilità in corrispondenza di questi siti che peraltro risultano ormai coperti da vegetazione e pertanto difficilmente monitorabili.

Tuttavia sono stati riscontrati altri fenomeni che possono interessare l'autostrada. Come già evidenziato nel precedente paragrafo, numerose frane sono localizzate nei pressi dell'abitato di Laurignano, vicino ad una serie di viadotti. Procedendo da Cosenza verso Altilia la prima è al km 262.1 in corrispondenza del viadotto Acqua Ceraso (Figura 35). Si tratta di uno scivolamento traslativo superficiale dell'estensione di una trentina di m.



*Figura 35. La frana sul viadotto Acqua Ceraso (km 262.1) fotografata da località Pigna.*

Poco più a sud il viadotto San Martino attraversa un'incisione sul cui fianco, al km 262.5, insiste un'altra frana dalle caratteristiche simili alla precedente ma più estesa (Figura 36). Un incendio avvenuto nell'agosto 2012 ha ulteriormente aggravato le condizioni di stabilità di questo versante (Figura 37) che non minaccia direttamente la carreggiata quanto piuttosto i piloni del viadotto. Un secondo dissesto, di modeste dimensioni, è situato al km 262.7, a ridosso della carreggiata sud.



*Figura 36. Frana del viadotto San Martino del km 262.5.*



*Figura 37. Frana del viadotto San Martino del km 262.5 fotografata dalla carreggiata sud.*

Procedendo verso Altilia si individuano un'altra frana all'imbocco della galleria Profenna, sul viadotto omonimo, al km 263.3 (Figura 38). Il dissesto, classificabile come uno scivolamento traslativo con locali fenomeni di crollo, si estende per un tratto di circa 50 m lungo l'autostrada, anche se non interessa direttamente la carreggiata quanto i piloni. Anche quest'area appare recentemente colpita da un incendio, il limite del quale sembra all'incirca coincidere con la corona della frana.



*Figura 38. Frana presso il viadotto e la galleria Profenna (km 263.3) ripresa da località Pigna.*

Al km 263.6, all'imbocco verso sud del viadotto Friddizza, si individua una frana di piccole dimensioni che, correndo parallela all'autostrada, non sembra rappresentare una seria minaccia per la stessa. Analoga è la situazione di un dissesto posto al km 275.7, lungo il viadotto Vallone Forneta, fra i paesi di Rogliano e Marzi.

Più rilevante è una frana larga circa 30 m situata all'uscita dalla galleria Ogliara al km 280.8, all'estremità nord del viadotto San Venere (Figura 31, Figura 39 e Figura 54). La situazione è resa più complessa anche dalla presenza a monte di una parete in roccia evidentemente suscettibile a crolli, come è anche suggerito dalla presenza di una rete paramassi posta poco sopra la galleria. Si tratta dell'unica frana individuata come instabile anche dai PS (vedi il paragrafo 3.6.2.C).



*Figura 39. Frana presso la galleria di Ogliara e il viadotto San Venere al km 280.8.*

L'ultima frana di interesse all'interno del tratto considerato si trova al km 283.5, all'altezza dell'abitato di Altilia, all'uscita sud della galleria Balzatelle sul viadotto Ranta (Figura 40). Sebbene disti circa 30 m dalla A3 rappresenta una potenziale minaccia per i piloni del viadotto. La frana è anche segnata in Figura 31 come la frana complessa posta più a meridione.



*Figura 40. Frana sul viadotto Ranta presso l'uscita sud della galleria Balzatelle, al km 283.5.*

Immagini multi-temporali e risalenti rispettivamente al 19/03/2004 ed al 14/08/2011 derivanti da Google Earth mostrano lo stato attivo della frana e del versante limitrofo, come si vede da una seconda frana posta più ad est che però interessa solamente una piccola strada di servizio a valle dell'autostrada.

Una sinossi riassuntiva dei fenomeni individuati in campagna e qui descritti è fornita in Tabella 2.



*Figura 41. Confronto multi-temporale della frana di Ranta tra due immagini satellitari.*

<b>N°</b>	<b>Progressiva/ Localizzazione</b>	<b>Comune (Provincia)</b>	<b>Distanza del versante dalla sede autostradale</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Foto</b>
1	km 262.1 - viadotto Acqua Ceraso	Dipignanano (CS) nei pressi di Laurignano	Pochi m dall'autostrada. Interessa i piloni del viadotto.	Dissesto apparentemente attivo largo circa 30 m. Classificabile come uno scivolamento traslativo superficiale	Figura 35
2	km 262.5 - viadotto San Martino	Dipignanano (CS) nei pressi di Laurignano	Pochi m dall'autostrada. Interessa i piloni del viadotto.	Attivo. Classificabile come uno scivolamento traslativo superficiale Largo circa 40 m	Figura 36 Figura 37
3	km 262,7 - viadotto San Martino	Dipignanano (CS) nei pressi di Laurignano	Sovrastante l'autostrada. Può interessare direttamente la carreggiata.	Movimento franoso di piccole dimensioni; apparentemente attivo. Classificabile come uno scivolamento traslativo.	
4	km 263.3 - imboccatura nord della galleria Profenna, sul viadotto Profenna	Dipignanano (CS) nei pressi di Pigna	Pochi m dall'autostrada. Interessa i piloni del viadotto.	Dissesto in stato di attività con una larghezza ci circa 50 m e un'estensione longitudinale superiore ai 60m. La frana è di tipo complesso (scivolamento traslativo-crollo).	Figura 38

5	km 263.6 - viadotto Friddizza	Dipignanano (CS) nei pressi Cozzo del Monaco	Poco distante dall'autostrada ma non la può interessare in quanto parallela ad essa.	Frana di scivolamento superficiale di piccole dimensioni.	
6	km 275.7 - viadotto Vallone Forneta	Marzi (CS) tra Rogliano e Marzi	Pochi m dall'autostrada. Interessa i piloni del viadotto.	Frana di rilevanza minore a causa delle sue piccole dimensioni e del poco volume di terreno che coinvolge. Superficiale e di tipo complesso.	
7	km 280.8 - imboccatura sud della galleria Ogliara, sul Viadotto San Venere	Altilia (CS)	Appena al disopra dell'imbocco della galleria. Può interessare la carreggiata.	Frana attiva di circa 30 m di larghezza. Movimento franoso in parte costituito da scivolamento superficiale e in parte da crolli. Sono presenti reti paramassi per la dai crolli.	Figura 39
8	km 283.5 - imboccatura sud della galleria Balzatele, sul viadotto Ranta	Altilia (CS)	Dista circa 30 m dalla galleria. Può interessare i piloni del viadotto.	Frana complessa di piccole dimensioni con segni di attività.	Figura 40

*Tabella 2. Schema riassuntivo delle principali frane individuate tramite il sopralluogo lungo il tratto Cosenza Sud-Altilia della A3.*

*TAS A20 Brolo-Patti (sostituito dal TAS A18 Messina Sud-Roccalumera).*

Come precedentemente evidenziato, a seguito dei sopralluoghi effettuati, questo tratto è stato sostituito dal TAS A18 Messina Sud-Roccalumera.

Si riportano comunque i risultati del sopralluogo.

Il tronco autostradale si estende tra gli svincoli di Brolo e Patti della A20, in provincia di Messina. La sua lunghezza complessiva è di 17,3 km di cui 7,7 in galleria. Il percorso è approssimativamente allineato E-O lungo la costa settentrionale della Sicilia, a nord dei Monti Nebrodi. I tratti non in galleria sono prevalentemente quello in cui l'autostrada segue il fondovalle della Fiumara S. Angelo in Brolo ed un breve tratto costiero in corrispondenza di Marina di Patti, zone caratterizzate da pendenze moderate.

La cartografia geologica a disposizione per questo tratto consiste nella nuova Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (Figura 42 e Figura 43). In questo TAS sono attualmente censiti almeno cinque fenomeni franosi, visibili nella carta di catalogazione delle frane (Figura 44).

La prima, partendo da est, poco prima dell'ingresso nella galleria Torretta, presso il viadotto di Marina di Patti (Figura 45), classificata come colamento lento, si colloca al contatto tra depositi alluvionali recenti e substrato litoide. In particolare:

**b<sub>b</sub>**: depositi alluvionali recenti (Plio-Pleistocene) e depositi di piana litorale, prevalentemente formate da ghiaie costituite da clasti eterogenei e poligenici e da sabbie grossolane a supporto di matrice limoso argillosa di colore grigio bruno (depositi di piana inondabile), passanti lateralmente a ghiaie in assetto stratoide, ubicate lungo fasce pedemontane (depositi di conoide alluvionale). Presentano spessori da pochi metri fino a 20 m;

**ASI**: argille scagliose dei monti Peloritani, costituite da argille varicolori, scagliettate e a luoghi a giacitura caotica, con intercalazioni di livelli sottili di calcari allodapici bianchi, siltiti carbonatiche grigie e argilliti silicee brune. Esse hanno uno spessore di circa 100 m (Cretacico superiore).

La seconda frana è un esteso scivolamento situato sul M. Palombara, dove la A16 entra nella galleria Capo Calavà, e si imposta sulle seguenti formazioni:

**FDN<sub>b</sub>**: filladi a tessitura scistosa che passano lateralmente a metareniti massive a grana fine. Queste appartengono al basamento varisco e possono raggiungere spessori di 700 m (Paleozoico);

**PMA<sub>f</sub>**: micasciti a grana per lo più grossa con tessitura da orientata a scistosa, appartenenti all'unità tettonica dell'Aspromonte (Catena Kabilo-Calabride del settore Peloritano), con spessore di circa 1000 m (Paleozoico).

Tuttavia, vista la sua localizzazione, rappresenta una minaccia remota per l'autostrada.

Considerazioni analoghe vanno fatte per un ulteriore fenomeno si trova al di sopra del tratto in galleria nei pressi di Petrarco. Tale dissesto, sebbene non interessi direttamente il sistema viario, se sufficientemente profondo, potrebbe comunque dare origine a criticità nella struttura della galleria stessa. La frana si trova sui depositi denominati  $PMA_r$  già descritti in precedenza.

Gli ultimi due fenomeni di instabilità, vicini l'uno all'altro e classificati entrambi come frane complesse, si trovano lungo la valle della Fiumara di S. Angelo in Brolo, in corrispondenza di Porteria (Figura 46) e si instaurano su gneiss occhiadini associati localmente con metagranitoidi; questi sono prevalentemente a grana e a tessitura orientata. Tale affioramento, come anche per la precedente frana descritta, fa parte dell'unità tettonica dell'Aspromonte ( $PMA_b$ ) di età paleozoica.



Figura 42. Carta Geologica d'Italia 1:50.000 contenente il tratto Patto-Brolo.

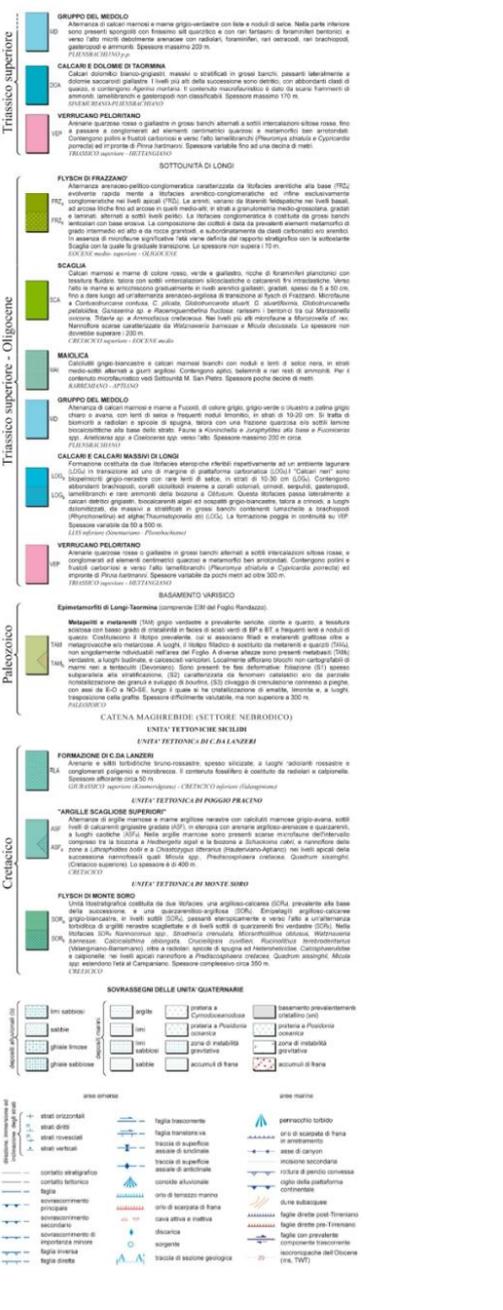


Figura 43. Rende della Carta Geologica d'Italia 1:50.000 – Foglio 599 “Patti”.

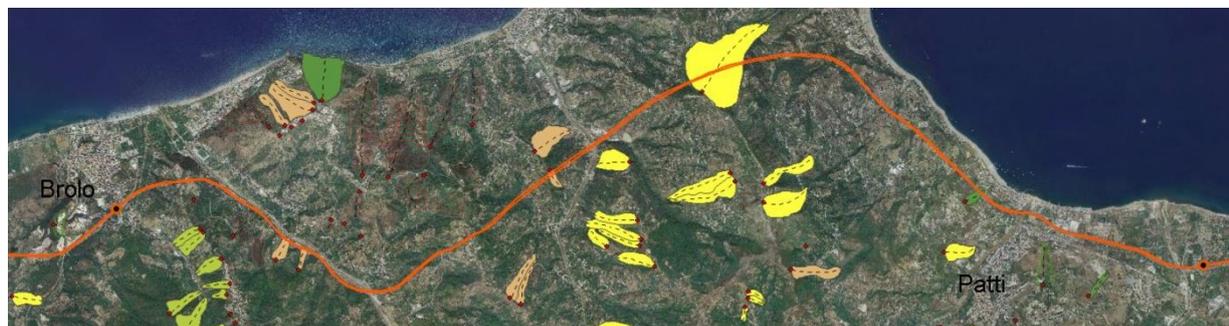


Figura 44. Visione generale delle frane cartografate lungo il TAS (linea arancione) dallo svincolo di Altia a quello di Cosenza sud (punti neri). La legenda è visibile in Figura 8.



Figura 45. Dettaglio delle frane presso Marina di Patti. La legenda è visibile in Figura 8.

La frana che ha maggiormente causato disagi negli ultimi anni, non segnalata negli inventari, è tuttavia quella che nel marzo 2009 ha colpito la carreggiata in direzione Messina alla confluenza con l'immissione dello svincolo di Brolo (Figura 47). Questo dissesto, di modesto volume, ha causato uno squilibrio locale del drenaggio provocando un allagamento parziale della carreggiata ed è stato risistemato nel 2010 tramite opere strutturali. Viste le ridotte dimensioni della frana e la sua successiva sistemazione si ritiene comunque che il caso presenti modesta attitudine al un monitoraggio tramite GB-InSAR.



Figura 46. Dettaglio delle frane presso Porteria. La legenda è visibile in Figura 8.



*Figura 47. Fotografie risalenti al 2009 della frana che ha interessato lo svincolo di Brolo.*

Durante il sopralluogo effettuato il 7 novembre 2012, non sono stati rilevati dissesti né evidenze di fenomeni franosi tali da fornire situazioni utili al monitoraggio tramite strumentazione GB-InSAR. Nemmeno nelle zone in cui la cartografia ufficiale individua fenomeni franosi e l'elaborazione tramite PS indica la presenza movimenti, sono stati localizzati dissesti di versante adatti.

Ad incidere sulla valutazione di stabilità dei versanti nell'intorno della tratta autostradale è stata l'assenza di indizi che denotano instabilità o che indicano la presenza di una instabilità passata, come:

- alberi inclinati verso valle o verso monte i quali richiamano rispettivamente scivolamenti traslativi e rotazionali;
- fratture e deformazioni nel terreno o nelle opere che si trovano nel raggio d'azione del movimento generato dalla frana;
- evidenze geomorfologiche individuabili alla scala del versante quali scarpate, lobi, accumuli di detrito e contropendenze;
- differenze sostanziali nel tipo di terreno o nella densità della vegetazione.

In particolare la presenza di una fitta vegetazione ha reso non necessario il ricorso a sopralluoghi ancor più mirati volti all'individuazione di eventuali fratture nel terreno, in quanto tali siti risulterebbero in ogni caso idonei ad un monitoraggio con un radar da terra in banda Ku in quanto non soddisfano il requisito di un versante scarsamente o moderatamente vegetato.

La mancata individuazione di fenomeni di instabilità pericolosi per l'autostrada può in parte essere attribuita anche ai prolungati tratti in galleria che costituiscono circa un terzo della lunghezza totale di questo TAS.

L'unica zona interessante in termini di rischio non riguarda direttamente la A20 ma potrebbe interessarla indirettamente sotto particolari condizioni. Si tratta dell'unità morfologica (UG) quella localizzata al km 81.2 al fianco dell'autostrada in cui, la presenza di una piccola valle (Figura 48) caratterizzata da versanti particolarmente acclivi e spogli di vegetazione a causa di un recente incendio, espone l'intera area allo sviluppo di possibili fenomeni franosi quali debris flows.

Il materiale movimentato da un eventuale fenomeno franoso di questo tipo avrebbe come sola via di evacuazione l'autostrada. La vallecola, infatti, è circondata su tre lati da versanti in cui la parte libera è in direzione di un sottopasso (Figura 49 e Figura 50) che attraversa l'autostrada e che rappresenta perciò una zona di confluenza. Qualora quest'ultimo venisse ostruito, il materiale franato raggiungerebbe facilmente le carreggiate dell'autostrada.



*Figura 48. Versante molto acclive e privo di vegetazione situato al km 81.2 nelle vicinanze della località Forno.*



*Figura 49. Sottopasso che attraversa l'autostrada.*



*Figura 50. Foto scattata dal sottopasso in direzione della vallecola.*

Ad esclusione di questa unica situazione di possibile pericolo, la tratta in questione è priva di attuali fenomeni franosi e di evidenze degli stessi. Questo tuttavia, non esclude la possibilità di innesco di fenomeni gravitativi nel futuro; al contrario, il rischio esiste considerando gli eventi che si sono già verificati in passato, ma non è possibile individuare una zona di sicura instabilità che possa produrre risultati apprezzabili in caso di monitoraggio con la strumentazione disponibile.

Perciò, in seguito ai risultati degli studi preliminari sopracitati, il TAS Patti-Brolo è stato scartato come candidato per la successiva fase del monitoraggio e sostituito da un TAS tra gli svincoli Messina Sud e Roccalumera sulla A18.

### 3.6.2.C ANALISI TRAMITE PS

---

La base dati relativa ai dissesti sui versanti a cui è stato fatto riferimento, si è rivelata molto disomogenea soprattutto per quanto riguarda le informazioni specifiche dei dissesti. I dati di partenza, oltre ai dati ancillari, riguardano principalmente l'inventario del progetto IFFI, disponibili in formato *shapefile* poligonale, consultato quindi in ambiente GIS. Il database associato a questo *shapefile* forniva però informazioni in merito allo stato di attività e alla tipologia del dissesto solo nel caso dell'area di studio ricadente nella Regione Calabria, mentre forniva informazioni sulla sola tipologia degli eventi franosi per quanto concerne la Regione Sicilia.

La mancanza di una base conoscitiva completa ed omogenea a scala di bacino ha determinato la scelta di indirizzare le attività verso l'individuazione delle eventuali situazioni a rischio più elevato, sulla base della radar-interpretazione. Il riconoscimento e la delimitazione dei corpi di frana si è basata, come primo approccio, sulla presenza o meno di PS aventi valori di velocità media inferiori a 1,50 mm/anno, corrispondenti a un movimento in "allontanamento" dal sensore e di conseguenza di abbassamento della superficie. L'identificazione dei versanti che presentano dei PS relativi a queste velocità, risulta immediata grazie alla loro classificazione che li restituisce di colori compresi tra il giallo e il rosso.

Per la definizione dell'estensione delle frane è stata presa in considerazione la geomorfologia in tutti i suoi aspetti (pendenza, andamento curve di livello, esposizione dei versanti ecc.) insieme alla consultazione delle carte redatte o dell'IFFI.

Di seguito vengono descritte le problematiche, laddove presenti, risultanti dall'interpretazione dei dati interferometrici per le aree di studio localizzate lungo i tronchi autostradali A20 e A3.

#### *TAS A3 Cosenza Sud-Altilia*

Come accennato, l'approccio della interpretazione radar si basa principalmente sull'individuazione di quelle zone che presentano evidenze di movimento tramite la presenza di PS. Nel caso specifico, l'attenzione è stata posta in maniera piuttosto mirata a tutte le aree contigue al tratto di autostrada considerato, o meglio a quelle zone dove il verificarsi di un dissesto possa rappresentare un fattore di rischio e danno per le infrastrutture e ovviamente per

le persone che ne fruiscono. Oltre alla presenza di PS indicatori di movimento si è tenuto conto della presenza dei fenomeni franosi riportati dall'inventario IFFI presenti sul territorio indagato e descritti nel paragrafo 3.6.2.B.

In Figura 51 è mostrata parte del TAS nelle immediate vicinanze dello svincolo di Cosenza Sud in corrispondenza del Comune di Laurignano (CS). La zona, come si evince dall'immagine, è caratterizzata dalla presenza di diversi fenomeni di dissesto, che secondo le specifiche dell'IFFI sono attribuibili a fenomeni franosi profondi e quiescenti. La presenza di dati interferometrici corrispondenti a bersagli che non presentano evidenze di movimento attribuibili a dissesti recenti, suggeriscono di confermare lo stato di attività attribuito dall'IFFI.

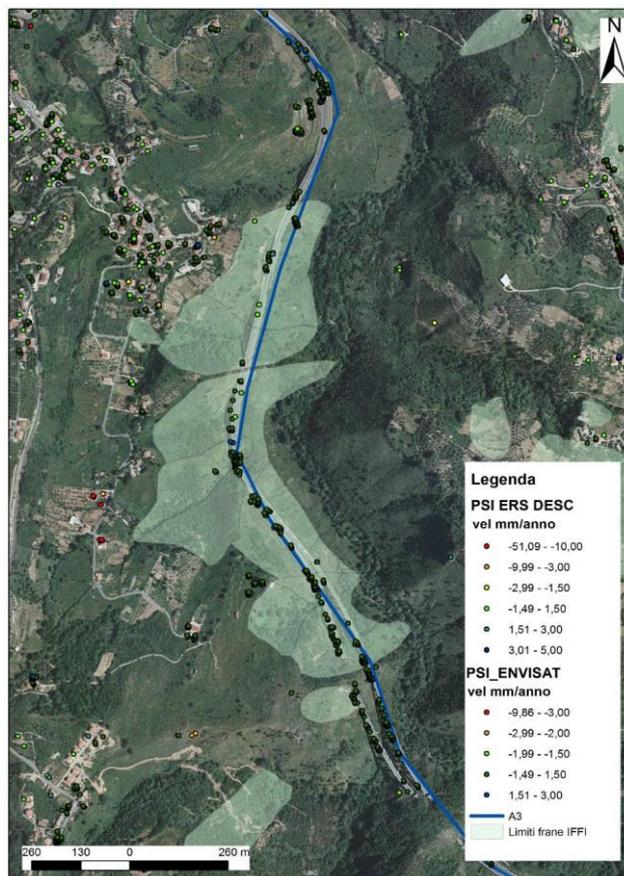


Figura 51. Distribuzione dei dati PS ERS ed ENVISAT nei pressi del comune di Laurignano (CS).

La Figura 52 mostra la distribuzione delle frane e di PS nella zona in prossimità della A3 in corrispondenza dei comuni di Donnici Superiore e Donnici Inferiore (CS).

E' evidente la presenza di fenomeni franosi, insistenti sull'infrastruttura, che l'IFFI ha classificato come frane di scorrimento o complesse quiescenti. I pochi PS corrispondenti a valori di velocità che potrebbero suggerire una situazione di movimento, risultano localizzati su un edificio e su una strada secondaria, il che presuppone che il fenomeno sia di tipo puntuale e non esteso al versante indagato.

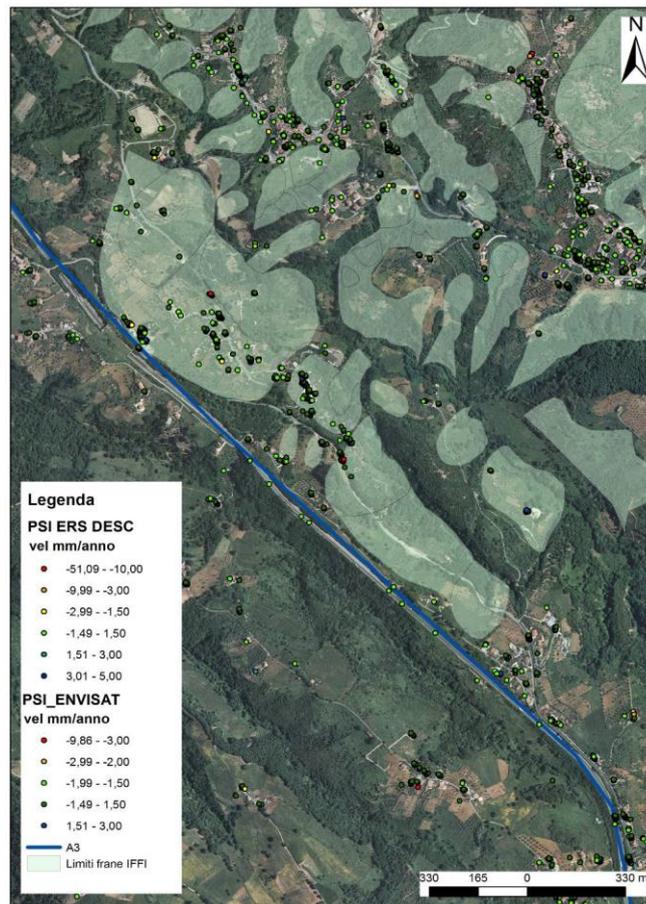


Figura 52. Distribuzione dei dati PS ERS ed ENVISAT nei pressi del comune di Donnici inf. e Donnici sup. (CS).

Proseguendo verso Altilia, si raggiunge una zona localizzata nei pressi del Comune di Belsito (Figura 32 e Figura 53) che è caratterizzata da una distribuzione di dati radar in corrispondenza dei fenomeni franosi identificati dall'IFFI. In questo caso le frane sono di scorrimento e lo stato di attività attribuito è quiescente. Analogamente ai casi precedenti l'interpretazione dei dati interferometrici risulta essere concordante con quella già fornita.

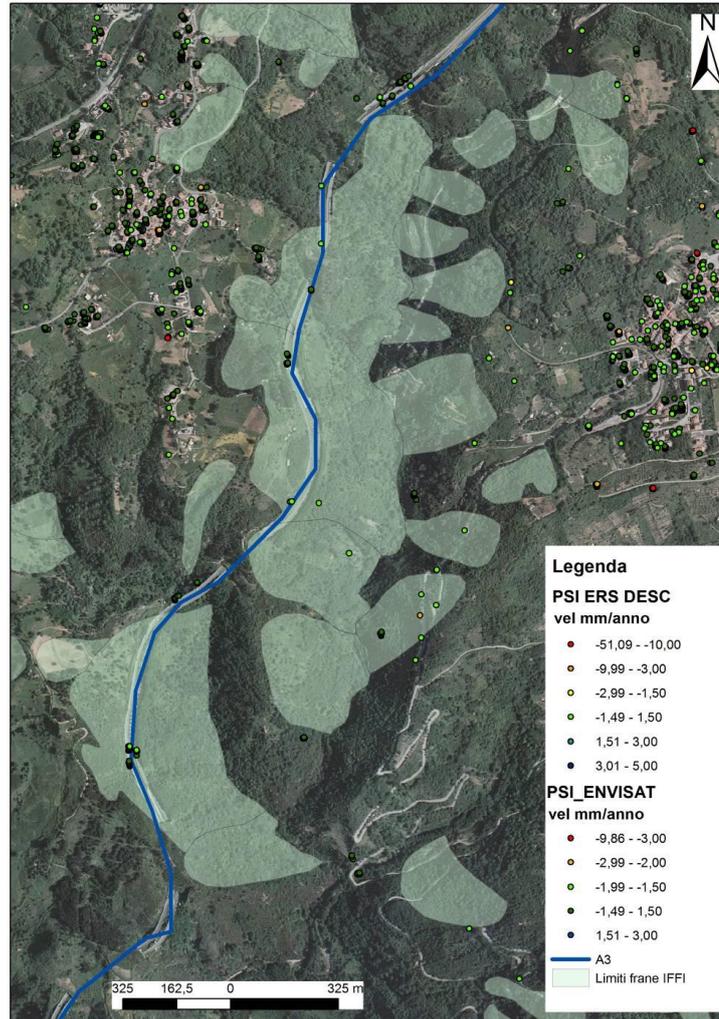


Figura 53. Distribuzione dei dati PS ERS ed ENVISAT nei pressi del Comune di Belsito (CS).

La Figura 54 mette in evidenza invece un'area posta in prossimità dello sbocco della galleria Ogliara, immediatamente a nord del viadotto S. Venere, a 5 km dello svincolo di Altilia (visibile anche in Figura 31 ed indicata come frana di scivolamento all'altezza di un'insenatura del Torrente Savuto). In questo caso la scarpata, delimitata in figura da un poligono rosso, è stata identificata come una zona che potrebbe essere soggetta a fenomeni di dissesto, previa validazione di campagna. Tale interpretazione fa riferimento all'identificazione di PS che evidenziano la presenza di un movimento in atto lungo il versante.

I detriti di un eventuale evento franoso potrebbero invadere l'autostrada proprio all'imbocco/uscita della galleria.

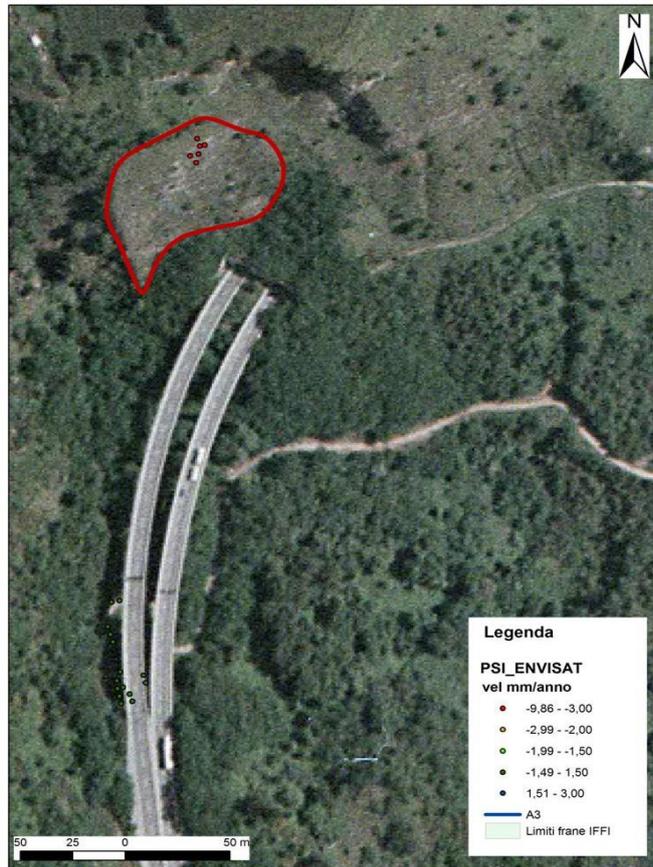
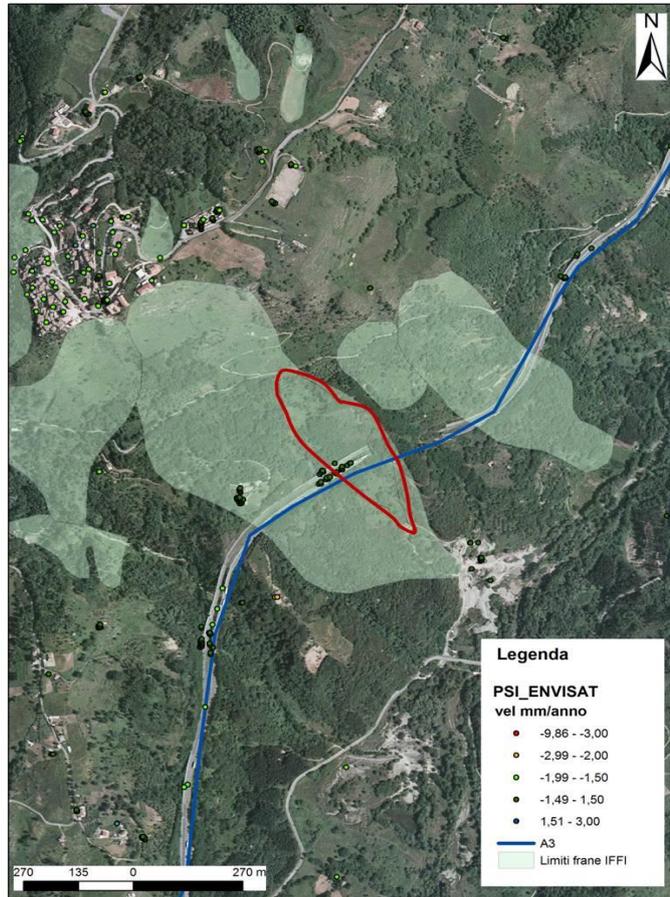


Figura 54. Distribuzione dei dati PS ENVISAT a nord del comune di Altilia (CS), in rosso, poligono che rappresenta il limite di una frana.

La Figura 55 mostra l'ultimo caso di studio che concerne l'autostrada A3, vicino allo svincolo di Altilia (CS), dove è evidente la presenza di aree soggette a dissesto e delimitate nell'ambito del progetto IFFI. Ad una porzione del versante in dissesto classificata come frana complessa (vedi la frana complessa localizzata più a sud in Figura 31) è stato assegnato uno stato di attività di tipo "attivo", seppur non siano presenti in questo caso evidenze interferometriche a conferma di tale attribuzione, questa interpretazione non è da escludersi e verrà, in occasione dei sopralluoghi per la validazione di campagna, verificata in loco.



*Figura 55. Distribuzione dei dati PS ENVISAT in corrispondenza dello svincolo di Altilia CS), in rosso, poligono che rappresenta il limite di una frana attiva.*

*(TAS A20 Patti-Brolo (sostituito dal TAS A18 Messina Sud-Roccalumera)*

Come precedentemente evidenziato, a seguito dei sopralluoghi effettuati, questo tratto è stato sostituito dal TAS A18 Messina Sud-Roccalumera.

Si riportano comunque i risultati dell'analisi sui PS.

Il tratto di autostrada si estende per circa 25 km tra gli svincoli del Comune di Patti e Brolo, ricadenti nella Provincia di Messina. Buona parte del tracciato

considerato si trova in galleria, attraversa la galleria di Capo Calavà e quella di Petrarò.

La presenza di lunghi tratti in galleria ha ridotto notevolmente le zone da sottoporre alla radar-interpretazione integrata ai dati ancillari in possesso.

Il primo caso di evento franoso potenzialmente d'interesse (mostrato in Figura 45 e Figura 56) si colloca nei pressi di Marina di Patti.

Questo caso, analogamente a quelli descritti precedentemente, è stato scelto sulla base della presenza di una frana mappata nell'ambito del progetto IFFI. L'evento è stato classificato come frana di scivolamento lento, ma l'inventario non fornisce informazioni sullo stato di attività. Dalla radar-interpretazione non si rileva la presenza di dati interferometrici riconducibili a fenomeni di scorrimento attivi.

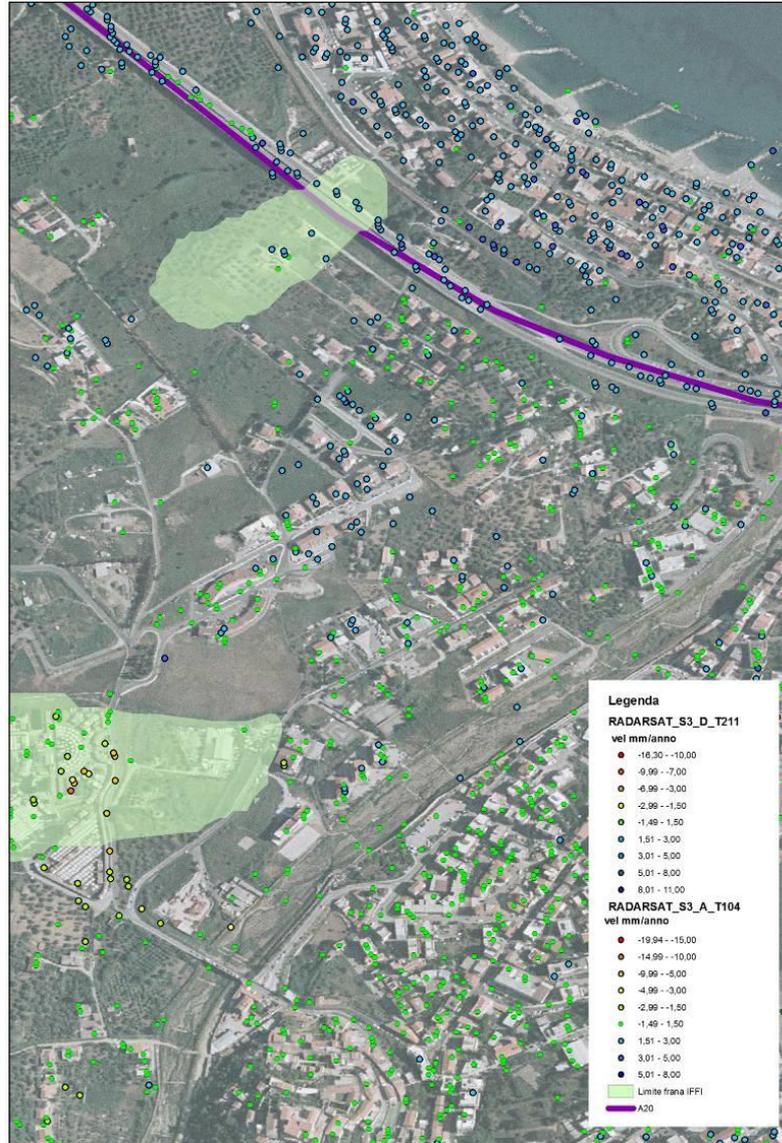


Figura 56. Distribuzione dei dati PS RADARSAT a sud del comune di Patti (ME).

Il secondo caso riscontrato, mostrato in Figura 46 e Figura 57, è ubicato circa 2 km a est dello svincolo di Brolo. In questa zona sono presenti due frane mappate dall'IFFI classificate come frane complesse.

La presenza di PS anche in questo caso non costituisce un elemento conoscitivo sufficiente all'attribuzione di uno stato di attività.

Si fa infine presente che lungo tutto il tratto di autostrada considerato sono presenti numerosi PS, i quali forniscono un quadro di generale stabilità dell'infrastruttura stessa.

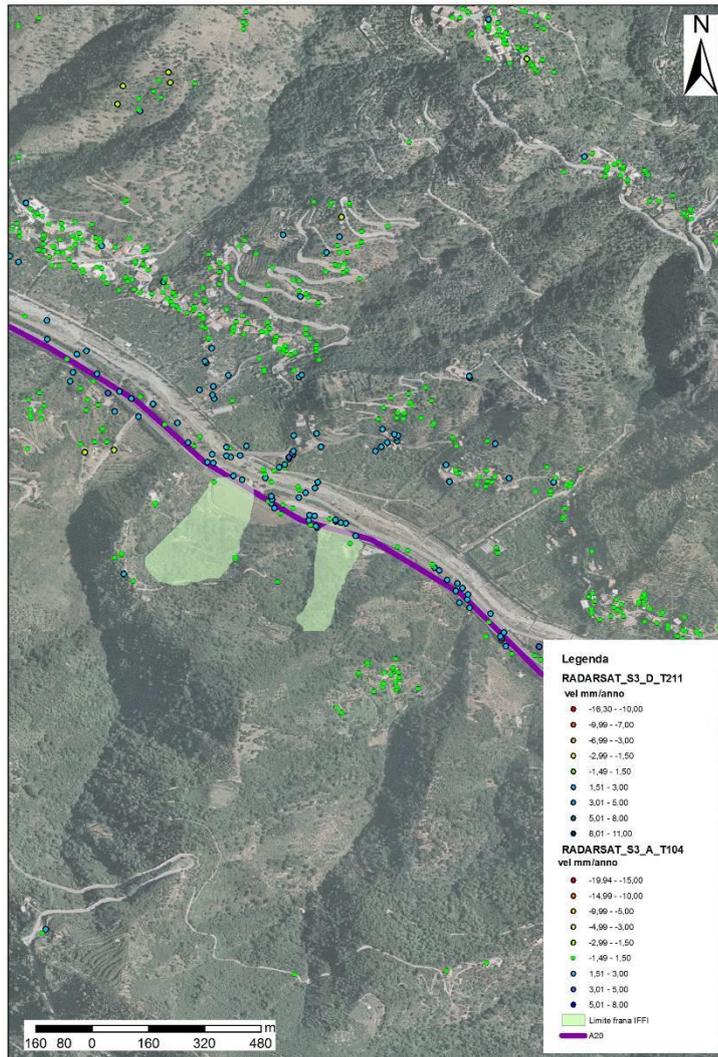


Figura 57. Distribuzione dei dati PS RADARSAT a sud del Comune di Brolo (ME).

## Campagne di acquisizione dati

A seguito dei risultati ottenuti durante la AE 3.6.2, si è passati alla fase di test tramite alcune campagne di acquisizione dati sui tratti autostradali. Vista la momentanea impossibilità di eseguire le misure sui TAS A16 e A18 a causa di sovrapposizioni con attività effettuate da altri *partner* del progetto, le campagne di acquisizione dati sono state eseguite sul TAS A3 e su una frana in Valdarno (AR) lungo l'autostrada A1. Tale attività ha lo scopo di testare l'operabilità sul campo del sistema anche dal punto logistico e di fornire una base di partenza per lo sviluppo delle AE 3.6.4, 3.6.5 e 3.6.6.

A seguito dei sopralluoghi effettuati nel settembre 2012 nell'ambito dell'AE 3.6.2, sono state individuate alcune UG (unità geomorfologiche) maggiormente interessate da dissesti e che presentano le caratteristiche idonee ai fini di un monitoraggio interferometrico basato a terra.

Per poter essere efficacemente monitorata tramite GB-InSAR, una frana deve rispondere ad alcune caratteristiche, di seguito elencate:

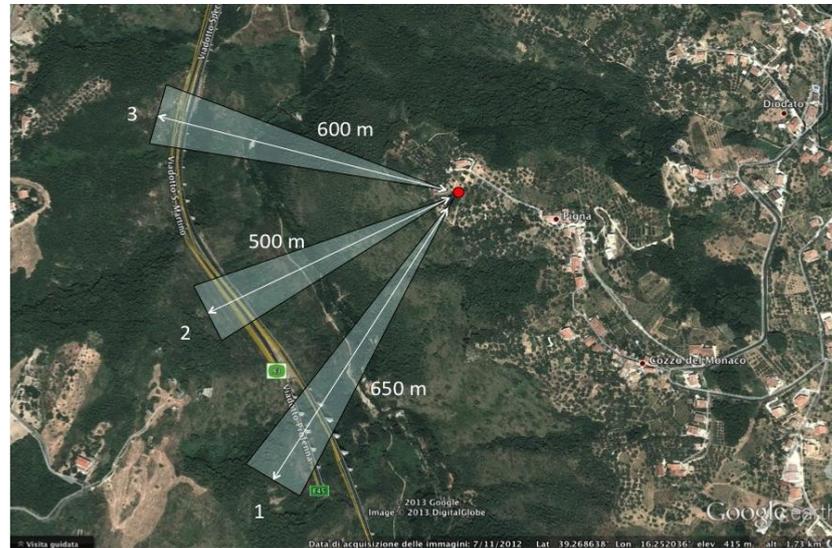
- Tipo di deformazione: una delle principali caratteristiche del GB-InSAR consiste nella capacità di fornire mappe di deformazione dello scenario osservato che consentano di comprendere il cinematismo di una frana ed eventualmente di poterne prevedere il collasso. Naturalmente ciò è possibile solo per quei dissesti che presentano un certo grado di deformazione prima dell'istante di rottura, come si verifica in presenza di fenomeni di *creep*. Ciò è in genere connesso al tipo di frana. Frane in roccia od in terra di grandi dimensioni tendono a mostrare lunghi periodi deformativi pre-collasso ben monitorabili tramite la tecnica interferometrica. Al contrario, piccole frane superficiali, cadute di massi o colate di detrito presentano un meccanismo di rottura di tipo "fragile", per cui il collasso avviene improvvisamente (ad esempio a seguito di un evento meteorico intenso) dopo una sostanziale condizione di stabilità; in quest'ultimo caso il monitoraggio interferometrico è sì applicabile, ma solitamente si limita a far registrare valori di spostamento nullo; pertanto si preferisce effettuare la misura dei parametri atmosferici (specialmente delle piogge), o del

contenuto d'acqua ed eventualmente impiegare segnalatori di evento in grado di fornire allarmi immediati in caso di collasso.

- Vegetazione: versanti densamente vegetati sono difficilmente monitorabili tramite un radar operante in banda Ku. Infatti la lunghezza d'onda utilizzata, sebbene garantisca una precisione ed accuratezza sub-millimetrica ed una risoluzione spaziale maggiore rispetto ad altre bande, non riesce ad oltrepassare la vegetazione per giungere fino al terreno. Il problema è che le aree vegetate, subendo movimenti continui a causa del vento e variazioni stagionali sia morfologiche che del contenuto d'acqua, non permettono all'immagine radar di mantenere valori di coerenza sufficientemente elevati. Ciò significa che in queste zone non è possibile effettuare alcun confronto di immagini in tempi diversi e che, in definitiva, non si possono ricavare informazioni relative al movimento.
- Velocità: se da una parte, come specificato anche in precedenza, è necessario che la frana presenti spostamenti apprezzabili, dall'altra è anche richiesto che questa non manifesti velocità di deformazione troppo elevate per poter essere misurate senza incorrere in problemi di ambiguità di fase o addirittura di decorrelazione. Generalmente, se viene soddisfatto il primo punto, le deformazioni di tipo creep rientrano tuttavia in un *range* di velocità facilmente monitorabili tramite GB-InSAR (almeno nella fase pre-collasso).
- Logistica: questo aspetto è solitamente superabile se si dispone di risorse adeguate, tuttavia è da tener sempre presente che un monitoraggio tramite GB-InSAR richiede un'alimentazione proveniente dalla rete elettrica o da un generatore (se per campagne di pochi giorni) e un punto di installazione protetto da atti vandalici, allineato il più possibile con la direzione di spostamento della frana, posto ad una distanza da essa che può andare da diverse decine di metri a pochi chilometri. La trasmissione dei dati, che generalmente costituisce una delle principali criticità, sarà oggetto di una specifica sezione del progetto e pertanto non verrà discussa in questa sede.

Per quanto riguarda il TAS A3, tra Cosenza Sud e Altilia, è stata individuata un'area, localizzata tra i km 262.6 e 263.4, interessata da almeno tre dissesti (Figura 58), tra cui quello al km 262.5 che interessa il viadotto San Martino e quello al km 263.3 sul viadotto Profenna già descritti precedentemente. Essi risultano ben osservabili dal versante opposto; in particolare, nei pressi

dell'abitato di Pigna è stato identificato un punto panoramico con caratteristiche valide per il monitoraggio di tutti e tre i fenomeni citati (Figura 59).



*Figura 58. Localizzazione del punto scelto per la sperimentazione del monitoraggio sul tratto A3 Cosenza Sud – Altilia e relativi campi di vista per i dissesti individuati.*



*Figura 59. Vista dal punto di installazione dello strumento selezionato per la sperimentazione. Il dissesto numero 1 (sul viadotto Profenna al km 263.3) è lo stesso visibile in Figura 38 mentre il numero 3 (sul viadotto San Martino, al km 262.5) è osservabile in Figura 36 e Figura 37.*

La sperimentazione dello strumento sull'area test è stata eseguita in data 5 marzo 2013. La portabilità dello strumento è stata resa più agevole mediante l'utilizzo di due autoveicoli per il trasporto. Il luogo prescelto per l'installazione è raggiunto da una strada carrabile che si diparte dalla frazione di Pigna ed è situato in un terreno agricolo adiacente ad una privata abitazione. Le attività di messa in opera (scarico, montaggio, accensione) dello strumento hanno richiesto l'impiego di quattro persone ed un tempo complessivo di circa 30 minuti.

Il test è stato eseguito puntando il radar su ognuno dei tre dissesti individuati per un intervallo di acquisizione di circa due ore ciascuno. Data la breve durata della sperimentazione, per l'alimentazione è stato utilizzato un gruppo elettrogeno Honda – EU10i.

Per ognuna delle tre frane monitorate sono state effettuate 8 acquisizioni, che hanno permesso di ottenere immagini in potenza, immagini in coerenza ed interferogrammi, ottenuti dal confronto dei risultati di due acquisizioni diverse.

Il primo dei tre dissesti monitorati è quello localizzato più a Sud, al km 263.4, in corrispondenza del viadotto Profenna (1 in Figura 59). La visuale non risulta disturbata da alcun tipo di ostacolo (Figura 60) e la copertura vegetale sul versante è scarsa, pertanto le immagini ottenute risultano caratterizzate da elevata potenza e coerenza del segnale (Figura 61 e Figura 62). Conseguentemente, gli interferogrammi, come osservabile dall'esempio in Figura 63, mostrano bassa rumorosità.



Figura 60. Campo di vista del primo dissesto monitorato.

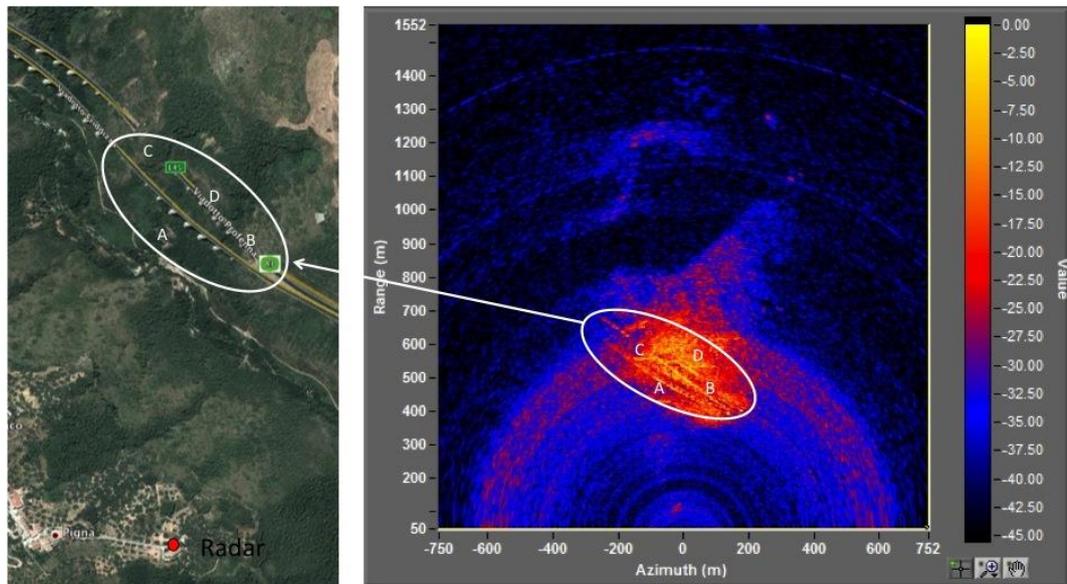


Figura 61. Confronto tra un'immagine ottica satellitare ed un'immagine in potenza relativa al primo dissesto monitorato. Le lettere indicano alcuni riflettori facilmente individuabili nell'immagine radar (A: viadotto Profenna Nord; B: viadotto Profenna Sud; C: viadotto Friddizza; D: rottura di pendio). E' anche possibile individuare dove le corsie si riuniscono e dove quella Sud entra nella galleria.

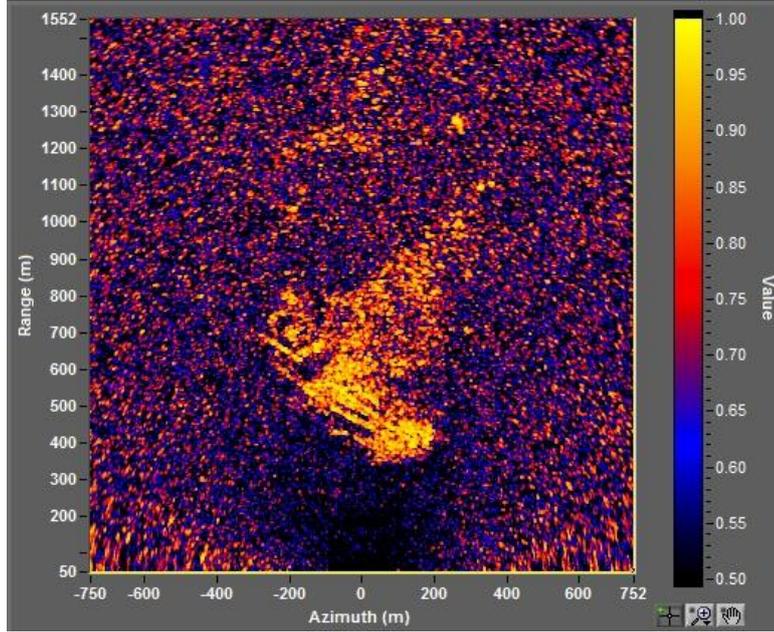


Figura 62. Immagine in coerenza relativa al primo dissesto monitorato.

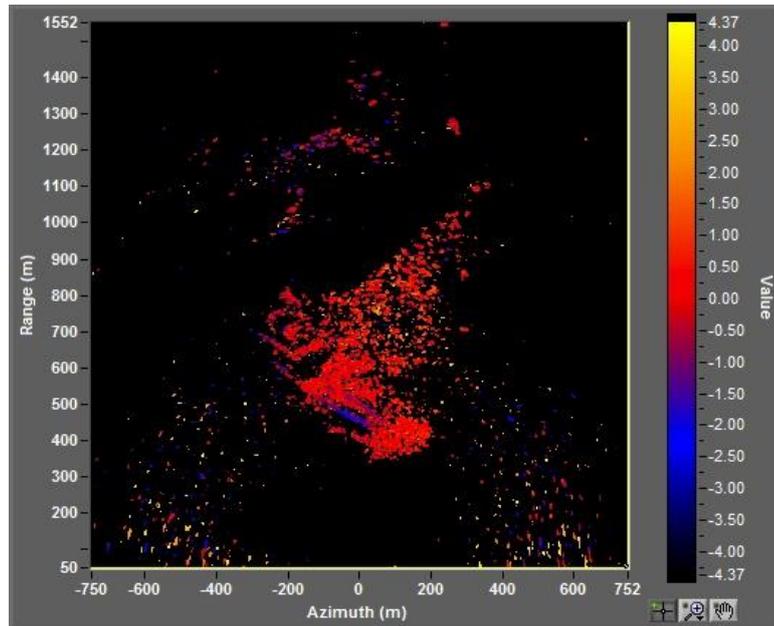


Figura 63. Interferogramma relativo al primo dissesto monitorato.

Con una traslazione di pochi metri dello strumento è stato inquadrato il secondo fenomeno franoso (2 in Figura 59), che interessa il tratto compreso tra il viadotto Profenna, a Sud, e il viadotto San Martino, a Nord. Anche in questo caso le condizioni di vista risultano buone (Figura 64). Sebbene il versante sia moderatamente vegetato, le immagini presentano valori di potenza e coerenza del segnale sufficientemente elevati (Figura 65 e Figura 66), pertanto anche gli interferogrammi ottenuti mantengono un buon rapporto segnale/rumore (Figura 67).



*Figura 64. Campo di vista del secondo dissesto monitorato.*

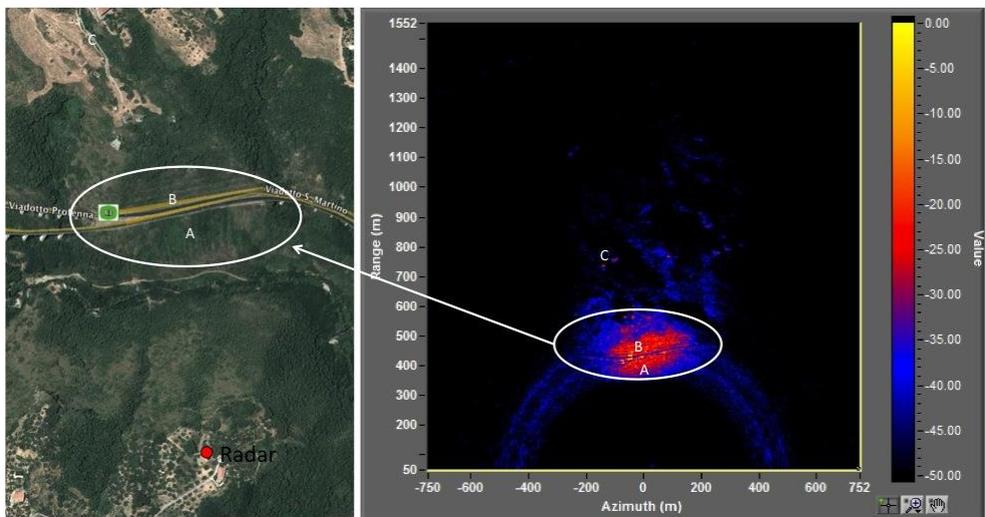


Figura 65. Confronto tra un'immagine ottica satellitare ed un'immagine in potenza relativa al secondo dissesto monitorato. Le lettere indicano alcuni riflettori facilmente individuabili nell'immagine radar (A: carreggiata Nord; B: carreggiata Sud; C: edifici).

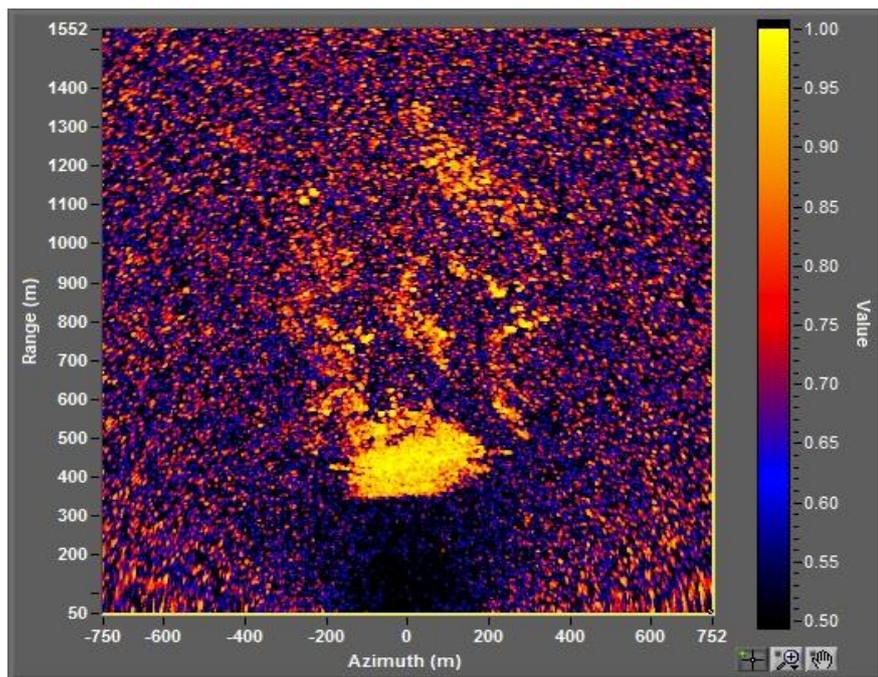
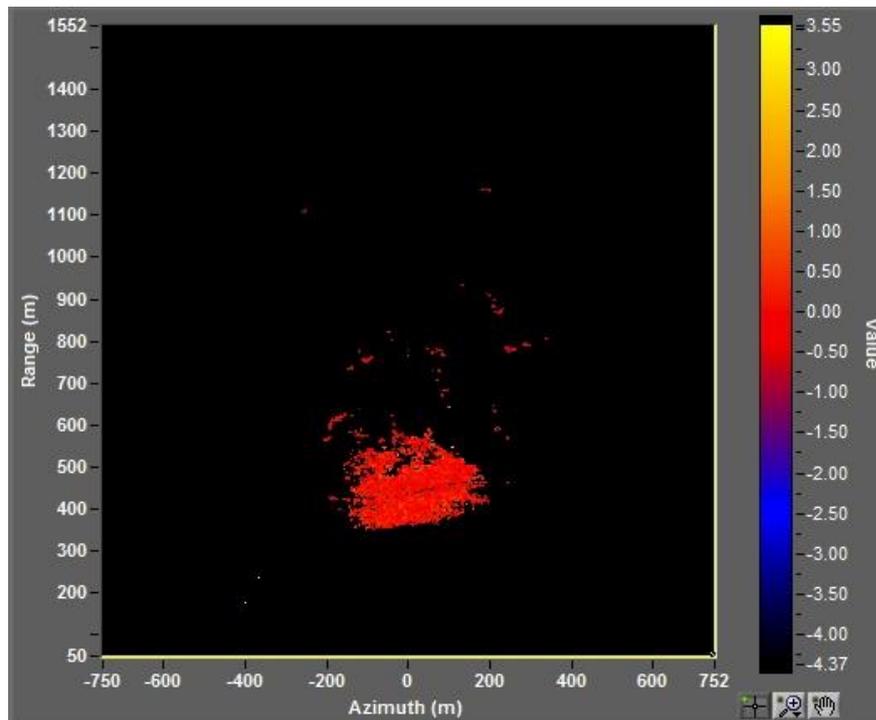


Figura 66. Immagine in coerenza relativa al secondo dissesto monitorato.



*Figura 67. Interferogramma relativo al secondo dissesto monitorato.*

Per inquadrare il terzo fenomeno franoso selezionato (3 in Figura 59), posto in corrispondenza del viadotto San Martino, il radar è stato spostato ulteriormente di pochi metri. Anche in questo caso l'operazione è stata effettuata in pochi minuti, disaccoppiando il castello di antenne dal supporto mobile e spostando i due elementi separatamente, prima di riassemblarli.

In questo terzo test il campo di vista è risultato parzialmente ostruito da alcuni alberi posti nelle vicinanze dello strumento; sebbene non siano direttamente lungo la traiettoria che collega il radar alla frana da monitorare, rientrano comunque nel campo di vista delle antenne e condizionano negativamente i risultati (Figura 68). Perciò, sebbene la potenza del segnale registrato sia buona (Figura 69), le immagini mostrano valori di coerenza minori, di conseguenza gli interferogrammi prodotti mostrano una maggiore rumorosità e decorrelazione del segnale (Figura 70).

Tali effetti di decorrelazione sono variabili nel tempo, ma nei casi peggiori compromettono completamente l'interpretazione del dato di spostamento (Figura 71).



*Figura 68. Campo di vista del terzo dissesto monitorato.*

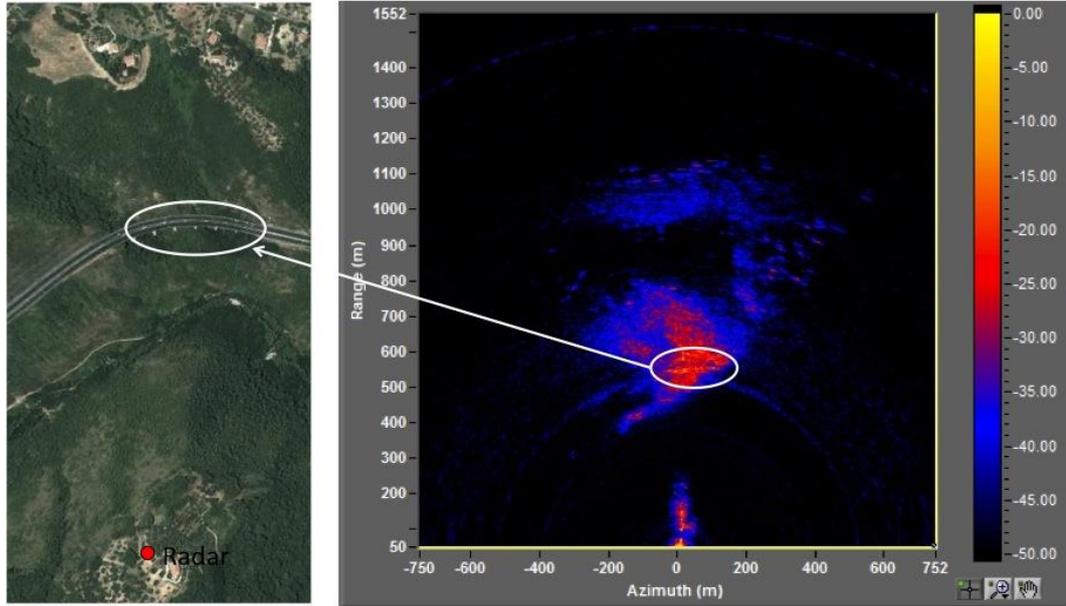


Figura 69. Confronto tra un'immagine ottica satellitare ed un'immagine in potenza relativa al terzo dissesto monitorato. A differenza dei due casi precedenti, sono visibili i riflettori in prossimità del radar.

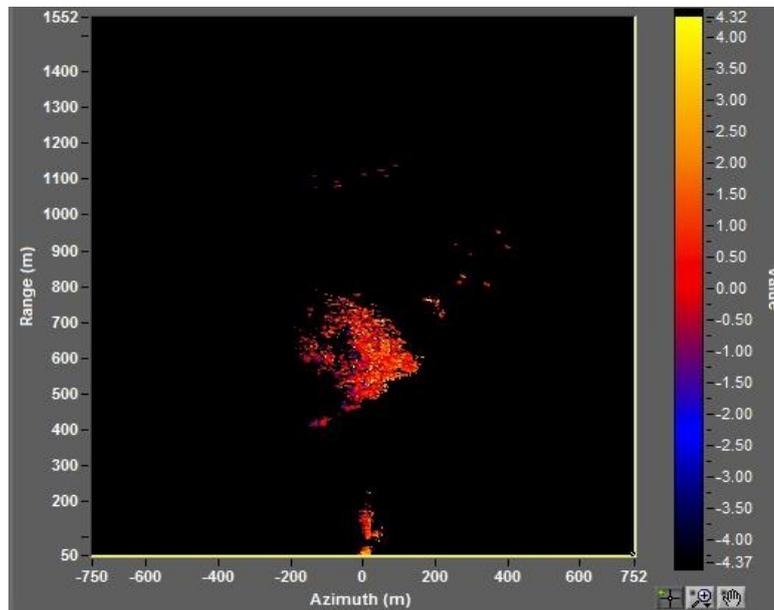


Figura 70. Interferogramma relativo al terzo dissesto monitorato.

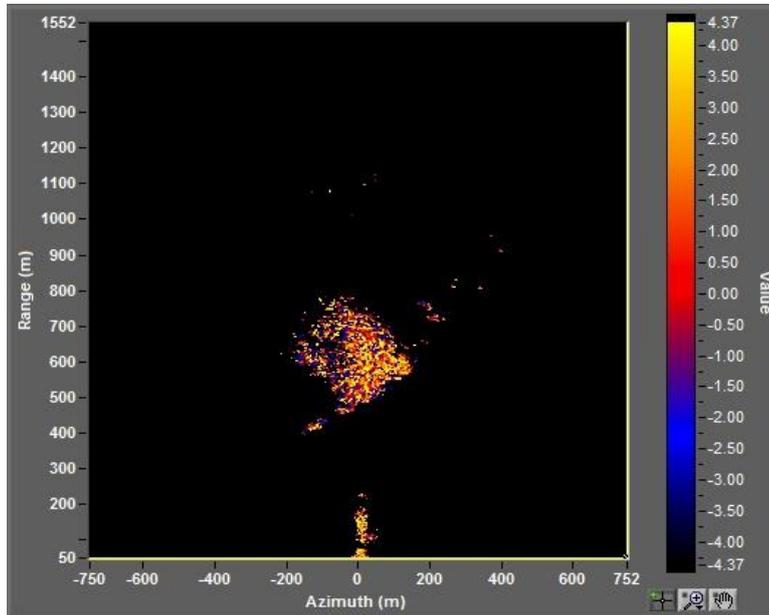


Figura 71. Interferogramma fortemente decorrelato relativo al terzo dissesto monitorato.

La sperimentazione ha permesso di verificare la trasportabilità dello strumento, la facilità di messa in opera ed i requisiti di funzionamento in condizioni di emergenza soprattutto per quanto riguarda l'alimentazione elettrica.

A questa campagna di acquisizione dati ha fatto seguito un *field test* nel Valdarno Superiore, più precisamente tra le frazioni di Levanella e Castiglione Ubertini nel Comune di Montevarchi (AR), volto a verificare in maggior dettaglio alcune funzionalità del radar interferometrico.

Nella zona è presente un'area in frana, con dimensioni di circa 300 metri in lunghezza e di circa 500 metri in larghezza, poco distante dalle carreggiate dell'autostrada A1 e della strada Provinciale "lungo Arno" che corrono parallelamente al fiume Arno (Figura 72). La frana, classificata come scivolamento rotazionale traslativo secondo la cartografia IFFI, si trova subito alla destra idrografica del fiume ed è in stato sospeso o dormiente (WP/WLI, 1993).



*Figura 72. Panoramica frontale della frana scattata il 31 gennaio 2013.*

Per quanto riguarda il sito di installazione dello strumento è stato scelto un campo privato pianeggiante ed esteso, perché posto geograficamente lungo il fondovalle, ad una distanza di circa 630 metri dalla prima scarpata di frana, al di là delle strade che costeggiano l'Arno, quindi alla sinistra idrografica di quest'ultimo. La postazione è risultata ideale per una globale visione, senza ostacoli vicini, di tutta l'area interessata dal dissesto (Figura 73).

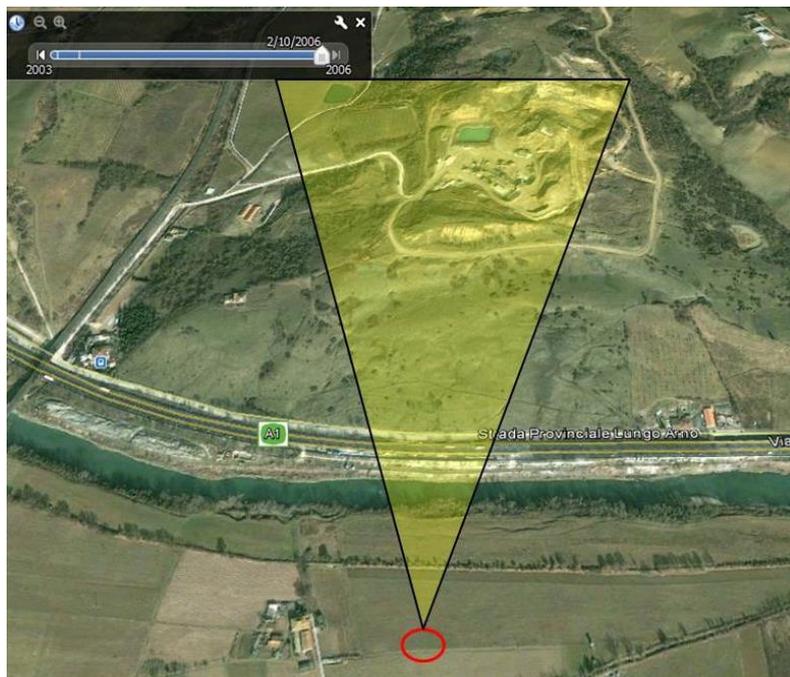
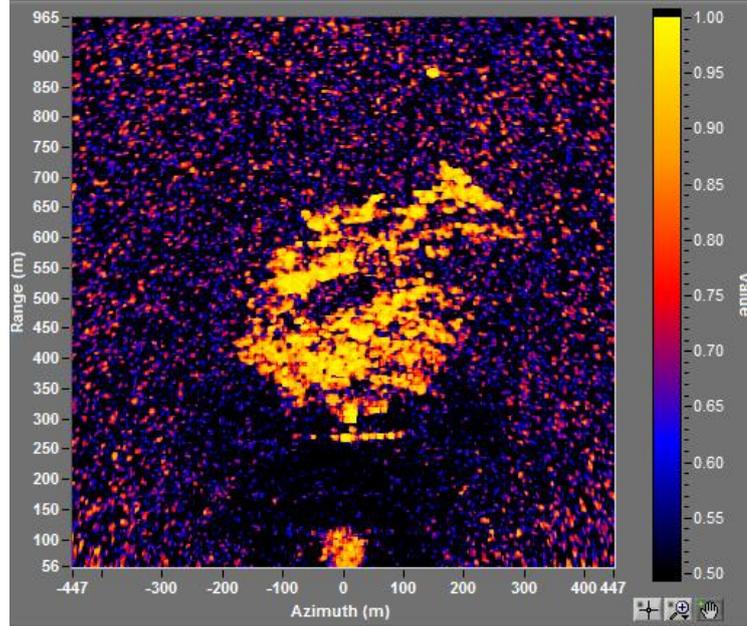


Figura 73. Immagine satellitare del 02/10/2006 che mostra una panoramica globale della posizione della frana (cerchiata in bianco) rispetto all'autostrada A1, alla strada provinciale, al fiume Arno e alla postazione di monitoraggio (cerchiata in rosso). Il triangolo in giallo rappresenta il campo di vista del radar.

Durante il *field test* è stato possibile verificare la fattibilità tecnica di un monitoraggio il cui campo di vista attraversasse direttamente il flusso autostradale (a differenza del caso eseguito lungo l'A3 in cui la ripresa era ben al di sopra dell'autostrada). Le criticità sono teoricamente legate al passaggio delle autovetture, che possono provocare una decorrelazione dell'immagine a causa della velocità del loro passaggio, ed all'elevata riflettività di strutture metalliche come *guard rails* i quali possono interferire con le misure relative allo scenario retrostante.

La mappa di coerenza (Figura 74) mostra invece che lo strumento ha mantenuto una coerenza al di sopra dello 0.8 per quasi tutto lo scenario e che i fenomeni sopra descritti hanno avuto solamente effetti locali.



*Figura 74. Immagine di coerenza restituita dallo strumento. Vengono evidenziate zone a scarsa coerenza (valori compresi tra lo 0 e lo 0.8, indicate con i colori dal nero al rosso) e zone a buona coerenza (valori da 0.8 a 1, in giallo e arancione).*

Durante i due *field tests*, data la loro breve durata, per l'alimentazione dello strumento è stato utilizzato un gruppo elettrogeno Honda – EU10i. In caso di monitoraggi di lungo periodo, come quelli da effettuarsi nell'ambito del WP 9.3, dato l'assorbimento energetico dello strumento (vedi AE 3.6.4), si renderà necessario l'allacciamento alla rete elettrica. In caso di monitoraggi di lungo periodo deve inoltre essere considerata l'esigenza di un'adeguata copertura che preservi lo strumento dagli agenti atmosferici e da eventuali atti vandalici. A tale proposito possono essere approntate delle strutture temporanee a basso costo, oltre che basso impatto visivo ed ambientale in base al luogo di installazione; in

Figura 75 sono riportati alcuni esempi. Infine al sistema deve essere garantito un accesso al *web* per il trasferimento dati. La mole dei dati trasmessi è dimensionata per essere trasferita con una semplice connessione 3G (vedi AE 3.6.6).

Tutti questi fattori devono essere quindi tenuti in considerazione in previsione della fase conclusiva della AE 9.3.1, per la quale sono previste una o più campagne di acquisizione dati di lunga durata.



*Figura 75. Esempi di strutture temporanee di protezione dello strumento in caso di monitoraggi di lungo periodo.*

## Ottimizzazione hardware sistema GB-InSAR

Questa attività riguarda l'individuazione di possibili adattamenti da effettuare sull'interferometro con il fine di ottimizzare il monitoraggio in continuo ed in emergenza dei fenomeni franosi in prossimità di tratti autostradali. Il sistema, pur mantenendo le caratteristiche di risoluzione e di precisione proprie dei sistemi GB-InSAR, è stato progettato in modo da rispondere alla necessità di avere una facile e veloce installazione. Questa caratteristica è favorita dalla modularizzazione dei vari apparati e dall'impiego di sistemi di agganciamento rapido, quali viti a quarto di giro, che garantiscono una buona stabilità e non richiedono l'uso di attrezzi per l'assemblaggio. Verifiche della funzionalità del sistema sono state effettuate in occasione della AE 3.6.3.

Uno dei punti salienti su cui si è concentrato lo studio ha riguardato il consumo elettrico, un fattore principalmente connesso con l'utilizzo di uno scatterometro basato su un analizzatore di rete vettoriale (VNA) per la generazione di microonde e la misura della fase e dell'ampiezza. Questo è uno strumento ad onda continua e a scansione di frequenza o *continuous wave-stepped frequency* (cw-sf), al contrario delle applicazioni da aereo o da satellite per le quali si preferisce usare radar a impulsi. È utilizzato soprattutto nell'ambito della ricerca e la sua funzione è di generare segnali coerenti, cioè stabili in fase ed ampiezza. Prove di laboratorio effettuate nell'ambito della presente AE hanno mostrato che, anche con l'impiego di attrezzature industriali per la generazione di microonde coerenti meno energivore, il consumo richiesto rende comunque imprescindibile l'allacciamento alla rete elettrica, facendo quindi reputare non idonee al monitoraggio speditivo ed a lungo termine soluzioni quali generatori o grossi impianti di pannelli solari.

Data l'esperienza acquisita negli anni dal DST-UNIFI sul monitoraggio di fenomeni franosi utilizzando sensori radar basati a terra, si ritiene che, considerando le caratteristiche delle frane in oggetto, la banda migliore da utilizzare per il radar sia la banda Ku (12.5-18 GHz). Il sistema che verrà implementato in fase di sperimentazione (Figura 76) è costituito da una componente meccanica, rappresentata da un binario (che di fatto realizza l'apertura sintetica) su cui viene traslato un castello con

le antenne ed una parte elettronica che gestisce la generazione del segnale e la sua trasmissione (il VNA); sebbene a scapito della risoluzione in azimuth, per favorire il trasporto e montaggio del sistema, il binario avrà dimensioni minori rispetto a quanto solitamente utilizzato in letteratura in quanto avrà una lunghezza di 210 cm (per un'apertura sintetica di 180 cm).

Un altro progresso riguardante il binario, sempre in direzione di una maggiore trasportabilità e quindi applicabilità in condizioni di emergenza, riguarda la riduzione della larghezza del binario stesso grazie alla modifica del supporto su cui si poggia il VNA. Infatti sul binario si muove il sistema delle due antenne (una trasmittente ed una ricevente) grazie ad un posizionario lineare, che ha la funzione di garantirne l'accurato posizionamento. L'acquisizione dei dati grezzi viene realizzata scomponendo l'intera lunghezza del binario in passi discreti ed imponendo al sistema di fermarsi in determinati punti per svolgere le misure radar. L'apertura sintetica viene realizzata focalizzando fra loro i dati così acquisiti. Il binario si estende perpendicolarmente alla direzione di puntamento delle antenne. A completare la parte meccanica vi è un supporto per le antenne che ne consente il corretto puntamento. Tra le modifiche effettuate durante questa AE ve n'è anche una che riguarda il castello per le antenne in modo tale da consentire adesso una maggiore ampiezza angolare verticale e quindi da permettere il monitoraggio anche di siti posti a quote più basse del punto di installazione.

Il sistema comprende anche una *power base* al cui interno vi è un gruppo di continuità (UPS, *Uninterruptible Power Supply*) che garantisce al sistema un voltaggio costante e continuo. Quest'aspetto logistico risulta importante se si considerano applicazioni in situazioni di emergenza, dove non è sempre facile disporre di una rete di alimentazione stabile. La *power base* comprende anche due *boards* per uno spazio disco aumentato a 1.8 TiB, tale da consentire monitoraggi a lungo termine. L'accesso alle *boards* avviene tramite un controllo remoto perfezionato in maniera tale da permettere di effettuare ogni operazione sullo strumento anche da remoto.

Uno dei principali miglioramenti *hardware* eseguiti durante questa AE è relativo al supporto dell'intero sistema. I GB-InSAR tradizionali (tra cui quelli commerciali) hanno la necessità di essere ancorati tramite barre a dei supporti quali solitamente blocchi o platee di cemento. Ciò chiaramente limita non solo la trasportabilità ma anche i tempi di installazione (soprattutto se il cemento per il basamento viene gettato sul posto). Le modifiche effettuate sul sistema del DST-

UNIFI invece hanno previsto una nuova piastra di ancoraggio che consente una facile e rapida installazione su due treppiedi. Opportune prove di monitoraggio hanno dimostrato una buona stabilità del sistema che non compromette le misure effettuate.

Gli elementi che costituiscono il sistema sono trasportabili per mezzo di un autoveicolo di medie dimensioni, mantenendo lo spazio per due passeggeri. Le attività di messa in opera (scarico, montaggio, accensione) dello strumento, se eseguite da 3-4 persone, richiedono un tempo complessivo di circa 30 minuti. Questi tempi ovviamente sono anche funzione della raggiungibilità del punto di installazione con i mezzi. In caso di trasporto manuale dello strumento dagli autoveicoli al sito di installazione la tempistica varia in funzione della distanza. Gli elementi in oggetto hanno infatti un peso che varia dai 20 ai 40 kg circa e necessitano di almeno due persone per essere trasferiti.



Figura 76. Foto del sistema GB-InSAR impiegato durante il field test in Valdarno.

## Sviluppo di software di processing e post-processing

I dati GB-InSAR rappresentano una grande fonte di informazioni, in quanto forniscono un valore di spostamento per ogni *pixel* all'interno dell'area monitorata. Ciò consente di produrre una mappa di spostamento, cioè un prodotto che supera la limitazione dei monitoraggi puntuali e consente di ottenere informazioni spazialmente continue e con una risoluzione geometrica dell'ordine del metro. Tuttavia l'importanza di questi dati dipende fortemente da un elemento critico rappresentato dalla precisione e dall'accuratezza delle misure, che sono solo nominalmente sub-millimetriche. Di fatto esse dipendono da numerosi fattori, il più importante dei quali è l'effetto dell'atmosfera sulla misurazione della fase delle microonde riflesse dallo scenario e ricevute dal sistema.

In seguito all'inizio dell'attività di acquisizione dati (AE 3.6.3), sono stati raccolti i primi dati di campagna GB-InSAR. Tali dati hanno mostrato una notevole influenza da parte delle condizioni atmosferiche ed in particolare della distanza esistente tra la postazione dello strumento e lo scenario bersaglio. Infatti, anche in assenza di precipitazioni, la temperatura e l'umidità dell'aria contribuiscono ad uno sfasamento dell'onda riflessa (non discernibile da uno sfasamento dovuto ad uno spostamento), in maniera tanto più intensa quanto maggiore è la distanza percorsa dall'onda stessa. Tale incremento è di norma considerato lineare, tuttavia ciò rappresenta un'approssimazione non sempre accettabile. In particolare, per l'applicazione prevista dal progetto, finalizzata all'impiego in condizioni di emergenza, gli algoritmi di correzione atmosferica attualmente in uso possono non essere soddisfacenti.

Pertanto, nell'ambito dell'attività 3.6.5, è stato sviluppato un *software* in linguaggio Matlab finalizzato a sostituire e migliorare gli algoritmi di correzione atmosferica e le altre funzioni offerte dal *software* proprietario connesso all'utilizzo commerciale del GB-InSAR. L'obiettivo è quello di creare un programma aperto e flessibile in grado di adattarsi alle necessità che si possono presentare di volta in volta differenti a seconda del tipo di sito monitorato e delle contingenze, anche logistiche, derivanti da applicazioni in condizioni di emergenza.

In particolare il *software* proprietario, seguendo un approccio tradizionale, tara il contributo dell'atmosfera sulla fase partendo da una regione ritenuta stabile ed assume un andamento lineare con la distanza.

Invece il software sviluppato ad hoc dal DST-UNIFI è stato ideato in modo da applicare un algoritmo di correzione atmosferica originale anche dal punto di vista della ricerca scientifica. Questo sistema, denominato REACT (REgion-removal Atmospheric Corrective Transformation, trasformazione atmosferica correttiva ad esclusione di regione) anziché considerare una singola regione stabile per la calibrazione necessaria alla rimozione del contributo atmosferico, lavora secondo la logica opposta: effettua la taratura prendendo in esame l'intero scenario, ma escludendo le regioni ritenute potenzialmente instabili o che non forniscono una risposta in ampiezza e coerenza sufficiente. L'utilizzo di un'area di taratura molto più grande permette uno studio statistico della relazione tra lo sfasamento dovuto all'atmosfera e la distanza e quindi il calcolo di una funzione di regressione che stimi tale andamento. Questo sistema, oltre a fornire risultati statisticamente più significativi, ha anche il vantaggio di fornire una funzione personalizzata per ogni sito che, teoricamente, può anche differire da quella lineare; ad esempio, nel caso di scenari molto variabili in altitudine, la differenza di quota contribuisce sull'atmosfera in maniera tale da produrre un andamento quadratico con la distanza (Figura 77). Il software REACT si tratta quindi di uno dei principali prodotti del progetto nell'ambito del WP3.6, sviluppato interamente dal DST-UNIFI.

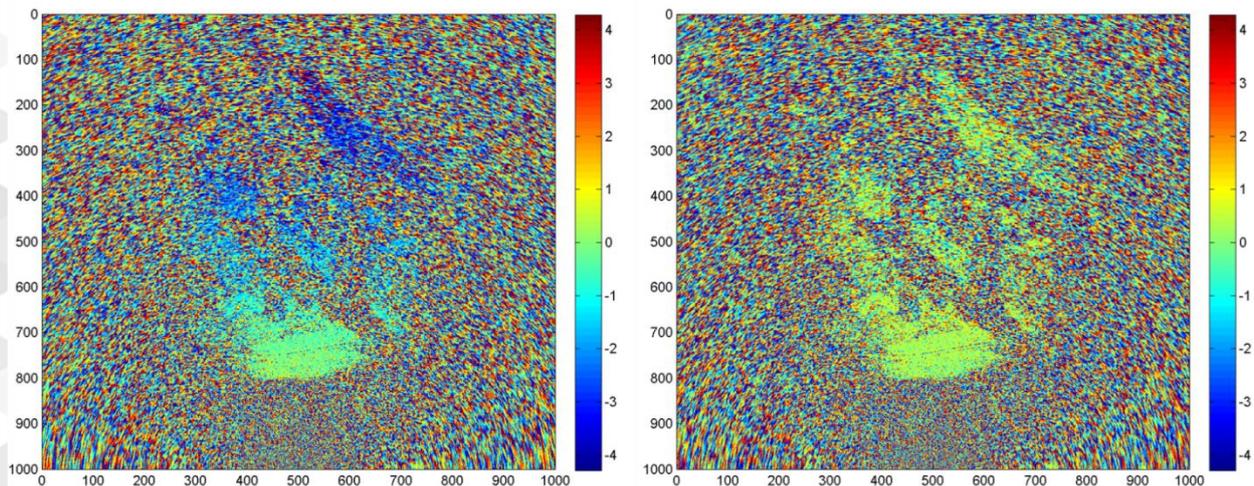


Figura 77. Interferogramma grezzo (a sinistra) e interferogramma corretto tramite REACT (a destra).

Lo sviluppo di algoritmi efficaci per la riduzione del rumore è fondamentale soprattutto vista l'applicazione in condizioni di emergenza, dove l'affidabilità del dato è di primaria importanza. Tuttavia la rimozione del contributo atmosferico da sola non è sempre sufficiente per garantire una buona accuratezza del dato. Sono quindi necessarie ulteriori fasi di elaborazione per correggere eventuali effetti residui; algoritmi per eseguire queste correzioni sono già stati parzialmente sviluppati nell'ambito di questa attività, ma richiedono ancora delle ottimizzazioni.

Il *software* realizzato nell'ambito di questa AE implementa anche ulteriori funzioni. Tra queste include la possibilità di mediare singole immagini interferometriche SAR da utilizzare poi per il calcolo dell'interferogramma. Questa procedura consente di stabilizzare quei *pixel* che non hanno un valore di fase stabile, in maniera da estrarre la maggior quantità di informazione possibile anche nelle aree con valori di coerenza più bassi (Figura 78). Questa metodologia risulta utile soprattutto per l'analisi di dati rumorosi.

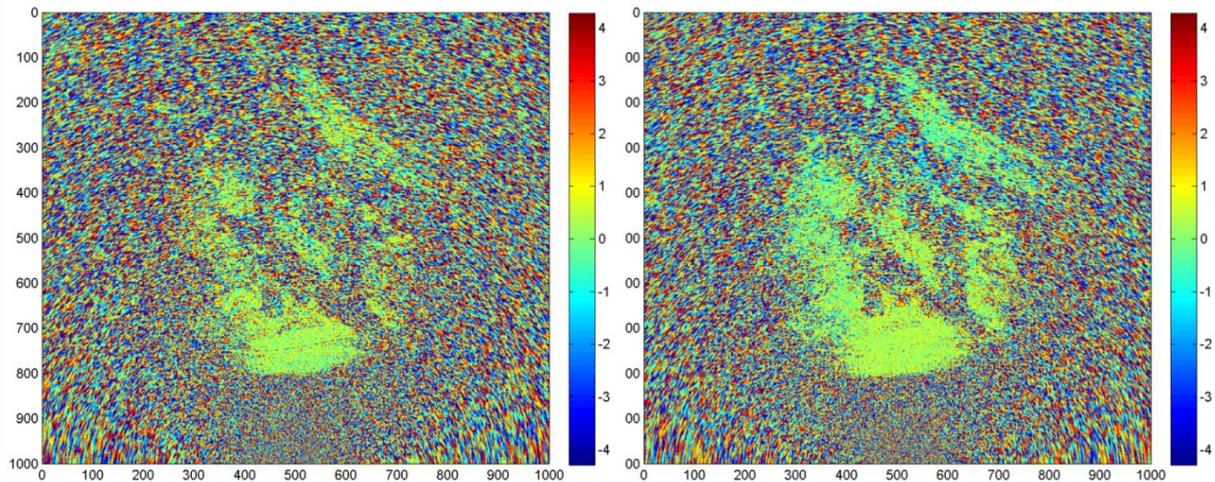


Figura 78. Interferogramma prodotto da immagini non mediate (a sinistra) e mediate (a destra).

Le informazioni di spostamento provenienti dagli interferogrammi possono infine essere sommate *pixel* per *pixel* in modo da produrre mappe di spostamento cumulato (Figura 79).

Queste, oltre a non presentare fenomeni di ambiguità di fase, riducono ulteriormente le fluttuazioni dei punti stabili che mediamente si attesteranno intorno a un valore nullo di spostamento. Questo tipo di prodotto è in particolare indicato per l'analisi delle deformazioni a lungo termine, in quanto evidenzia i limiti delle regioni instabili.

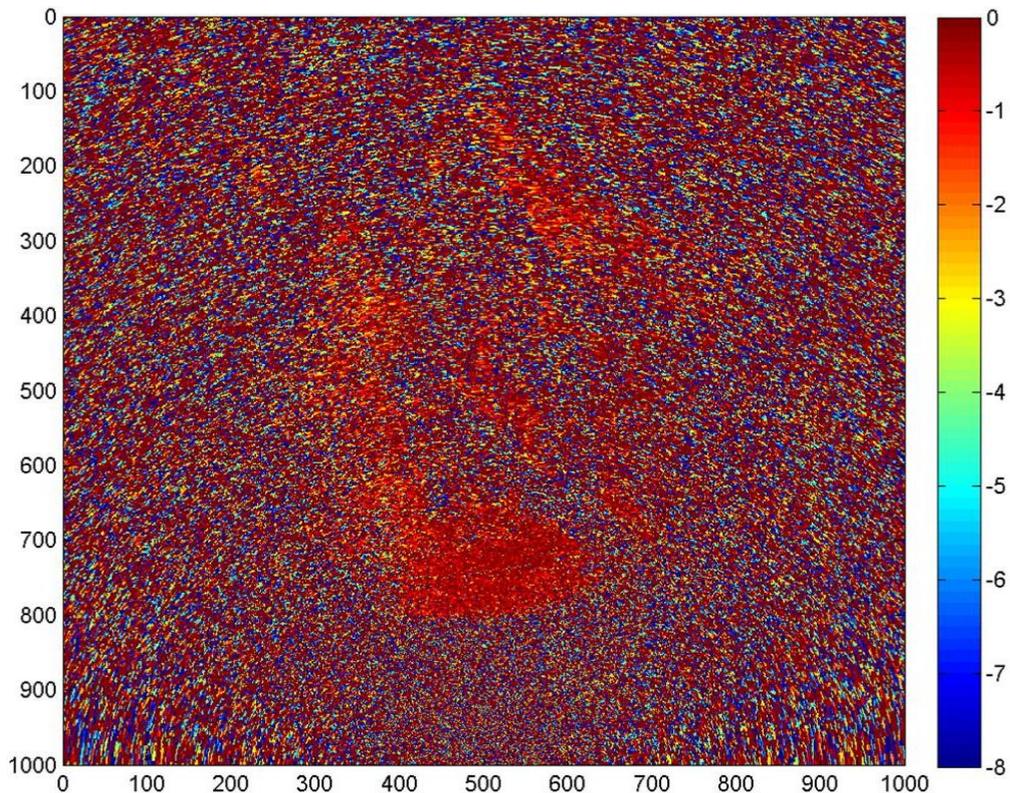


Figura 79. Mapa di spostamento cumulato.

Le condizioni emergenziali richiedono inoltre l'impiego di soluzioni rapide ed effettuate *in situ*, in modo tale da occupare, nella minore misura possibile, la rete di trasmissione con dati grezzi ancora da elaborare. Ciò è di particolare importanza per tutti quei casi in cui non sia disponibile una connessione rapida tramite modem. Per questa ragione il *software* consente anche di estrarre dalle mappe di spostamento alcune serie storiche da punti rappresentativi. Questi dati, pur nella loro copertura spaziale puntuale, sono atti ad essere impiegati per soglie di allertamento ed hanno comunque un contenuto informativo elevato con un minimo impiego di memoria.

Al fine di ridurre anche le dimensioni delle mappe di spostamento queste potranno essere ritagliate inquadrando con precisione lo scenario di interesse.

#### ATTIVITÀ ELEMENTARE 3.6.6

### Valutazione automatica dell'instabilità e validazione

Anche grazie ai perfezionamenti sviluppati nelle AE 3.6.4 e 3.6.5, il sistema interferometrico che verrà impiegato in fase di sperimentazione (AE 9.3.1) è predisposto in maniera tale da permettere la valutazione automatica dell'instabilità del versante osservato. Tale valutazione consta di 4 parti:

1. acquisizione dei dati in continuo, grazie all'elevata frequenza di misurazione dell'interferometro ed alla possibilità del *software* sviluppato di elaborare i dati in automatico;
2. trasmissione rapida dei dati mediante l'applicazione di procedure per la gestione del flusso di dati, che consentono l'ottimizzazione del consumo di banda per il monitoraggio in remoto;
3. individuazione automatica del superamento di valori soglia di velocità di spostamento della frana, con comunicazione in tempo reale all'operatore dell'eventuale superamento delle stesse per la validazione;
4. individuazione automatica dell'istante di collasso della frana tramite verifica in continuo di un modello previsivo, con comunicazione in tempo reale all'operatore dell'eventuale superamento delle stesse per la validazione.

Parte fondamentale di questa attività risiede quindi proprio nella definizione di procedure di trasmissione e di un flusso dati idoneo per monitoraggi in remoto ed in condizioni di emergenza, cioè situazioni in cui sono richieste informazioni in tempi brevi e con connettività a internet spesso sub-ottimale. Questa attività è stata condotta in collaborazione con l'OR 5 e l'OR 6 per quanto riguarda le modalità di trasmissione dei dati tramite la *middleware* LEWARNET e la codifica da parte del CAED.

Il GB-InSAR acquisisce un'immagine radar in media ogni 5 minuti; queste consistono in matrici 1001x1001 di valori complessi, contenenti informazioni relative alla fase ed all'ampiezza di ciascun *pixel* rappresentante una specifica area sulla scena; ciascuna immagine ha le dimensioni di circa 8 MiB e ne sono necessarie due per ottenere un interferogramma. Il *software* REACT, sviluppato

interamente dal DST-UNIFI nel ambito del progetto come risultato dell'AE 3.6.5, è installato su un PC esterno; tramite una connessione LAN colleziona i dati prodotti dall'interferometro e li elabora per calcolare gli interferogrammi e quindi le mappe di spostamento. Di *default* vengono prodotte mappe di spostamento utilizzando l'ultimo dato disponibile ed il dato acquisito rispettivamente 5 minuti, 8 ore e 24 ore prima. Questa impostazione viene modificata a seconda della velocità tipica della frana, al fine di inquadrare l'intervallo temporale più idoneo a caratterizzarne gli spostamenti.

Dopo aver calcolato gli interferogrammi, REACT ha la funzione di effettuare la correzione atmosferica, mediare i dati, calcolare mappe di spostamento cumulato ed estrarre le serie storiche di spostamento di una serie di punti di controllo opportunamente scelti sulla scena, sulle quali verranno applicate soglie di attenzione semi-automatiche basate sui valori di velocità di spostamento; superati tali valori si ritiene plausibile un'accelerazione del fenomeno osservato, potenzialmente in grado di condurre ad una fase parossistica della frana; pertanto la definizione di tali soglie di attenzione è una questione complessa, risultato di una serie di fattori.

Coerentemente con quanto previsto dalle attività del CAED e con particolare riferimento al documento "06 Informazione dei sensori e operatività del CAED (VER. 2.0)", vengono identificati quattro stati:

- stato 0 = nessuna variazione
- stato 1 = piccola variazione
- stato 2 = media variazione
- stato 3 = grande variazione

che, definendo cambiamenti nei valori relativi alle informazioni ricavate dai sensori di monitoraggio, descrivono l'attività della frana in oggetto; il passaggio da uno stato all'altro è definito dalla variazione al di sopra di determinate soglie di parametri precursori di un collasso. Poiché l'**informazione tipica** ricavata da tale strumento è lo spostamento, la variazione di tale parametro (cioè la velocità) costituisce il tipo di soglia da dover superare. Trattandosi di 4 stati, numerati da 0 a 3, è dunque necessario individuare 3 soglie.

In una prima fase, verranno definiti dei valori di soglia preliminari, basati su dati di letteratura e sulle caratteristiche geologiche e geomorfologiche del fenomeno osservato. Ciò è necessario vista l'immensa variabilità che caratterizza questo tipo di fenomeni, difficilmente racchiudibile all'interno di valori prefissati. In

Tabella 3 è riportata la classificazione delle frane basata sulla velocità del movimento (Cruden e Varnes, 1996), in Tabella 4 è invece riportata una stima approssimativa delle velocità di spostamento per diverse tipologie di fenomeni franosi. La Tabella 4 verrà utilizzata come riferimento per definire tali valori soglia indicativi, che, in un secondo momento, in base ai dati acquisiti durante un opportuno periodo di registrazione di misure, verranno tarati nuovamente, in base all'entità ed all'andamento dei movimenti registrati.

CLASSE	DESCRIZIONE	VELOCITA' TIPICA
I	Estremamente lento	6 mm/anno
II	Molto lento	16 mm/anno
III	Lento	1,6 m/anno
IV	Moderato	13 m/mese
V	Rapido	1,8 m/h
VI	Molto rapido	3 m/min
VII	Estremamente rapido	5 m/s

Tabella 3. Scala di intensità delle frane basata sulle velocità (Cruden e Varnes, 1994).

TIPO	Crollo	Scivolamento				Colamento		
<b>MATERIALE</b>	Roccia	Roccia	Detrito	Terra	Roccia	Detrito	Terra	
<b>ATTIVITA'</b>		N	R		N	R		
<b>VELOCITA'</b>	VI-VII	V- VI	I- V	I-VI	V- VI	I- V	I-II	I-VII I-IV

Tabella 4. Velocità delle frane (riferita alle classi della Tabella 3) in base a tipologia del movimento, materiale e stato di attività. N=Neoformazione; R=Riattivazione (Canuti e Casagli, 1996).

Nello stato 0 (nessuna variazione dall'ordinarietà) viene effettuata l'acquisizione di immagini radar ogni 5 minuti ed il calcolo di interferogrammi su intervalli di tempo proporzionati alla velocità di spostamento del periodo (in generale verranno calcolati interferogrammi a 5 minuti, 8 ore e 24 ore). Per entrare nello stato 1 sarà necessario superare la soglia 1 che naturalmente corrisponderà, a meno di un fattore di sicurezza, con la precisione dello strumento. In questo modo una variazione maggiore della soglia 1 indicherà una

variazione significativa anche dello stato del versante. Poiché il rumore sulle misure varia anche in funzione della distanza dal bersaglio e dalle caratteristiche climatiche locali non è possibile definire tale soglia a priori.

Analogamente vengono definite soglie per lo stato 2 e 3 (rispettivamente soglia 2 e 3), al cui superamento, il sistema provvede ad inviare un messaggio di posta elettronica agli operatori; il messaggio viene generato automaticamente dal *software*, tramite un apposito *script*, realizzato in ambiente Matlab. A questo punto gli operatori potranno accedere al CAED per la verifica manuale e l'interpretazione dei dati di spostamento; questo passaggio ha l'importante funzione di ridurre il numero di falsi positivi, comuni nel caso di sistemi completamente automatici. In caso di necessità sarà anche possibile accedere al *computer* remoto che gestisce l'interferometro, ad esempio nel caso in cui si sospettino malfunzionamenti del sistema. Inoltre, in automatico, il sistema inizierà a fornire interferogrammi anche ad intervalli di tempo più brevi rispetto a quelli previsti nello stato 0.

A partire dal superamento della soglia 2 (indicante il verificarsi di una variazione di media intensità dello stato di stabilità della frana), vengono eseguite in continuo anche verifiche per la previsione dell'istante di rottura mediante il metodo di Fukuzono (1985). Quando una frana caratterizzata da un comportamento viscoso (*creep*) si avvicina all'istante di rottura (*creep* terziario), i valori di velocità di spostamento seguono un andamento di tipo iperbolico rispetto al tempo. Teoricamente la curva di velocità può continuare ad aumentare nel tempo in modo asintotico fino alla rottura, o diminuire ed andarsi a stabilizzare su un valore costante, tornando ad una nuova condizione di equilibrio (Figura 80).

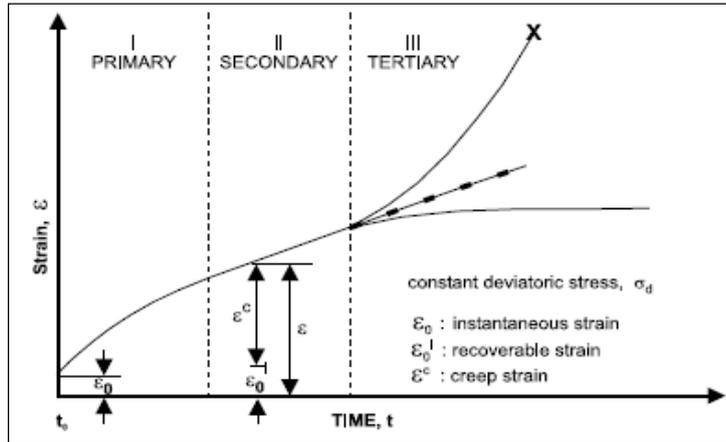
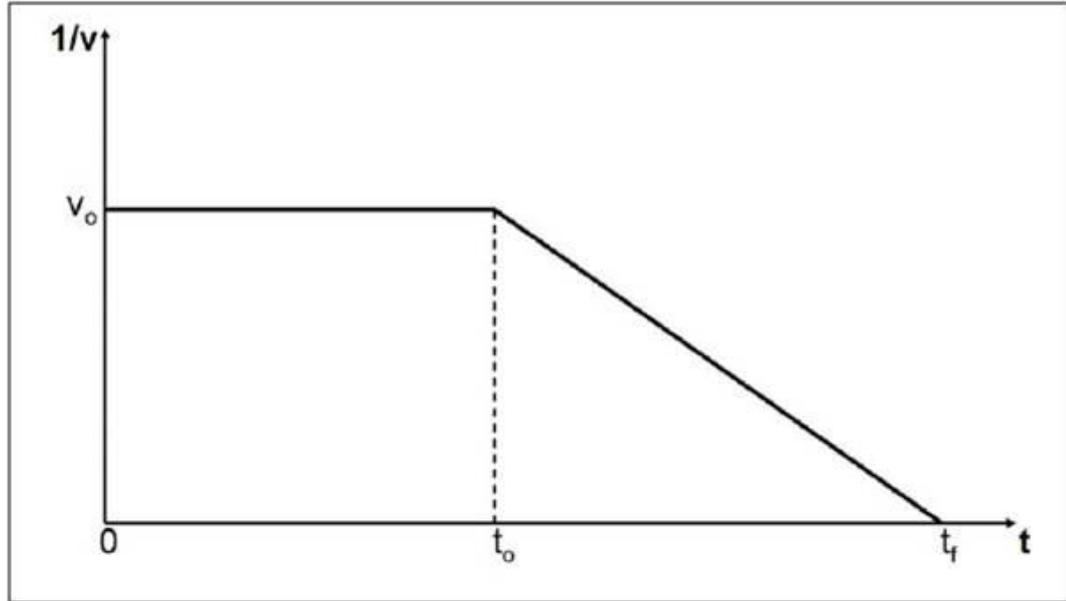


Figura 80. Comportamento teorico del creep per materiali continui e suoli coesivi osservati in laboratorio; con X viene indicata la rottura (Crosta & Agliardi, 2003).

L'evoluzione di una frana durante il *creep* terziario può essere interpretata attraverso metodi empirici, il più utilizzato dei quali è appunto quello di Fukuzono (1985). Questo consiste nel diagrammare il reciproco della velocità in funzione del tempo, interpolare la retta di regressione e proiettarla fino a farla raggiungere l'asse delle ascisse, quando cioè  $1/v = 0$  (con  $v$ =velocità), nel punto che ha come coordinata del tempo l'istante di rottura previsto ( $t_f$ ) (Figura 81).

Applicando il metodo di Fukuzono è possibile concepire un sistema per entrare nello stato 3 alternativo al superamento della soglia 3, e cioè non appena la proiezione del reciproco della velocità converge verso la previsione dell'istante  $t_f$ .

La peculiare semplicità del metodo di Fukuzono lo rende particolarmente adatto ad essere utilizzato in condizioni di emergenza, in cui la valutazione rapida dell'istante di rottura rappresenta un obiettivo fondamentale.



*Figura 81. Tipico andamento del diagramma del reciproco della velocità in funzione del tempo, per movimenti di creep terziario.*

In tutti i casi di passaggio da uno stato ad uno maggiore o minore, verrà anche automaticamente emesso un messaggio di posta elettronica agli operatori dell'interferometro, che avranno quindi la possibilità di validare l'effettivo allarme, verificando i dati interferometrici mediante l'accesso al CAED.

Questo prevede opportune procedure di trasferimento dati. Nello specifico, le mappe di spostamento vengono trasformate in file ASCII ed eventualmente riquadrate in maniera tale da eliminare i pixel al di fuori dell'area di interesse; l'informazione relativa ai punti di controllo (una stringa per ciascun punto, contenente solo l'ultima lettura, riferita all'intervallo di tempo tra la penultima e l'ultima acquisizione) vanno a popolare un datapath condiviso, presente sul PC esterno. Il middleware LEWARNET sviluppato dall'OR 5 ha invece la funzione di individuare il caricamento di nuovi dati nella cartella condivisa, per poi trasmetterli (tramite 3G, wi-fi o altre connessioni wireless), dopo averli trasformati in stringa, per poter essere letti dal CAED; le dimensioni del dato da trasferire risultano in questo modo ridotte al minimo.

Quindi, sulla base di quanto descritto, la stringa di trasmissione dati, oltre a contenere sempre l'informazione di spostamento differenziale di n punti di controllo (ctrl1, ctrl2, ctrln), ad intervalli prefissati (di default 5 minuti, 8 ore, 24 ore), contiene anche la matrice ASCII degli spostamenti (intra\_scenari), secondo la seguente sintassi:

```
{ 'message': '[interferometro 2013-10-01 17:30:23 #scan_response ] -  
ctrl1: 10.44 -ctrl2: 11.78 -intra_scenari: [(12,56,89,23),(),(),(),]' }
```

Infine il CAED (OR 6) provvede alla raccolta dei dati, a cumulare i valori di spostamento dei vari punti di controllo, alla codifica degli ASCII tramite una scala di colori e alla georeferenziazione delle mappe di spostamento. E' tramite l'interfaccia web-GIS fornita dal CAED che è possibile controllare i dati, gli eventuali superamenti di soglia e le previsioni dell'istante di rottura, automaticamente rilevate da REACT sui punti di controllo.

In Figura 82 è possibile osservare una schematizzazione del flusso dei dati dall'interferometro al CAED.

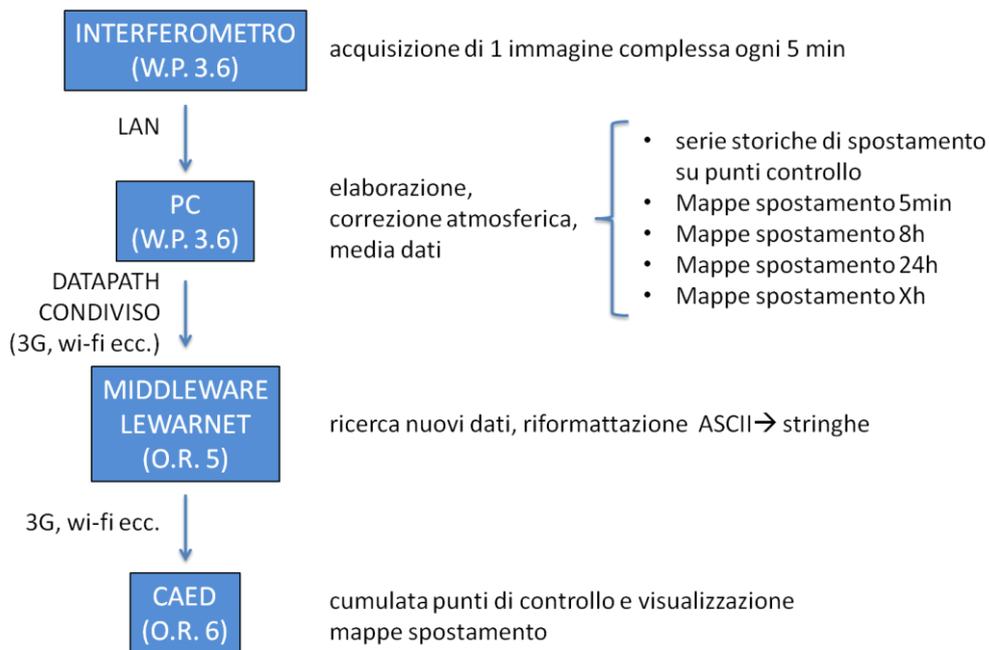


Figura 82. Flusso dei dati dall'interferometro al CAED.

Questo trattamento dei dati consente di ridurre al minimo indispensabile le informazioni trasmesse dall'interferometro, rispetto alla grande quantità di informazioni che genera. Ciò è di particolare importanza se si considera che, nell'esperienza del DST-UNIFI in qualità di Centro di Competenza della Protezione Civile, la connessione a internet rappresenta solitamente l'anello debole di un sistema di monitoraggio da remoto, specialmente in caso di installazioni d'emergenza. Pertanto si è resa necessaria la progettazione di soluzioni adatte anche a condizioni di connettività ridotta.



### ***Riferimenti bibliografici***

Amodio-Morelli L., Bonardi G., Colonna V., Dietrich D., Giunta G., Ippolito F., Liguori V., Lorenzoni S., Paglionico A., Perrone V., Piccarreta G., Russo M., Scandone P., Zanetti-Lorenzoni E., Zuppetta A., 1976. L'Arco Calabro-Peloritano nell'orogene appenninico-maghrebide. Mem. Soc. Geol. It., 17, 1-60.

ARPA Piemonte, Colombo A., Troisi C., Cucchi A., 2007. L'utilizzo della tecnica PSInSAR™ come contributo per lo studio e l'analisi dei processi deformativi in Piemonte -<http://gisweb.arpa.piemonte.it/>

Casnedi R., 1988. La Fossa bradanica: origine, sedimentazione e migrazione. Mem. Soc. Geol. It., 41, 439-448.

Casolari E., Negri A., Picotti V., Bertotti G., 2000. Neogene stratigraphy and sedimentology of the Gargano Promontory (S. Italy). Eclogae geol. Helv., 93, 7-23.

Ciaranfi, N., Ghisetti, F., Guida, M., Iaccarino, G., Lambiase, S., Pieri, P., Rapisardi, L., Ricchetti, G., Torre, M., Tortorici, L., Vezzani, L., 1983. Carta Neotettonica dell'Italia meridionale. Pubbl. 515 Prog. Fin. Geodin. C.N.R., 62 pp. Bari.

Ciaranfi N., Pieri P., Ricchetti G., 1988. Note alla carta geologica delle Murge e del Salento (Puglia centromeridionale). Mem. Soc. Geol. It., 41, 449-460.

Ciaranfi N., Gallicchio S., Loiacono F., 2011. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 421 "Ascoli Satriano". Serv. Geol. It., Roma.

Cremonini G., Elmi C., Selli R., 1971. Note illustrative della C.G. d'It., Foglio 156 "S. Marco in Lamis". Serv. Geol. d'It., Roma.

Crostella A., Vezzani L., 1964. La geologia dell'Appennino foggiano. Boll. Soc. Geol. It., 83, 121-142.

D'Alessandro A., Laviano A., Ricchetti G., Sardella A., 1979. Il Neogene del Monte Gargano. Boll. Soc. Geol. It., 18, 9-116.

D'Argenio B., Pescatore T., Scandone P., 1973. Schema geologico dell'Appennino meridionale (Campania e Lucania). Acc. Naz. Lincei, Quad., 183, 49-72.

Dazzaro L., Di Nocera S., Pescatore T., Rapisardi L., Romeo M., Russo B., Senatore M.R., Torre M., 1988. Geologia del margine della catena appenninica tra il Fortore ed il T. Calaggio (Monti della Daunia - Appennino Meridionale). Mem. Soc. Geol. It., 41, 411-422.

Del Ventisette C., Intrieri E., Luzi G., Casagli N., Fanti R., Leva D., 2011. Using ground based radar interferometry during emergency: the case of the A3 motorway (Calabria Region, Italy) threatened by a landslide. Natural Hazards Earth System Sciences, vol. 11, n. 9, pp. 2483-2495, doi:10.5194/nhess-11-2483-2011.

Doglioni C., Mongelli F., Pieri P., 1994. The Puglia uplift (SE Italy): an anomaly in the foreland of the Apenninic subduction due to buckling of a thick continental lithosphere. Tectonics, 13, 5, 1309-1321.

Elter P., Grasso M., Parotto M., Vezzani L., 2003. Structural setting of the Apennine- Maghrebian thrust belt. Episodes, 26, 3, 205-211.

ESA, 2007. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation.

Farina P., Casagli N., Ferretti A., 2007. Radar-interpretation of InSAR measurements for landslide investigations in civil protection practices - First North American Landslide Conference, June 3-8, 2007, Vail, Colorado.

Ferretti A., Ferrucci F., Prati C., Rocca F., 2000. SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique - Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International. Vol.7, Issue 2000, pp. 3219 – 3221.

Finetti I., Del Ben A., 1986. Geophysical study of the Tirrenian opening. *Boll. Geof. E Appl.*, 28 (110), 75-156.

Finetti I., Lentini F., Carbone S., Catalano S., Del Ben A., 1996. Il sistema Appennino meridionale – Arco Calabro – Sicilia nel Mediterraneo centrale: studio geologico-gofisico. *Boll. Soc. Geol. It.*, 115, 529-559, 12 ff,

Gallicchio S., Pieri P., Festa E., Moretti M., Tropeano M., 2002. Caratteri geologici del Foglio 407 “San Bartolomeo in Galdo”. *Congresso Int. Di Cartografia Geologica. Bologna, Febbraio 2002*, 3, 136-139.

Giannandrea P., La Volpe L., Principe C., Schiattarella M., 2004. Carta geologica del Monte Vulture alla scala 1:25.000. LAC, Firenze.

Haccard D., Lorenz C., Grandjaquet C., 1972. Essai sur l'évolution tectogenetique de la liaison Alpes-Appennines (de la Ligurie a la Calabre). *Mem. Soc. Geol. It.*, 11, 309-381.

Lentini F., Carbone S., Catalano S., Di Stefano A., Gargano C., Romeo M., Strazzulla S., Vinci C., 1995. Sedimentary evolution of basins in mobile belts: examples from Tertiary terrigenous sequences of the Peloritani Mts (NE Sicily). *Terra Nova, Vol. Spec.*, in stampa.

Luzi G., Pieraccini M., Mecatti D., Noferini L., Guidi G., Moia F., Atzeni C., 2004. Ground-based radar interferometry for landslides monitoring: atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42 , n. 11, pp. 2454-2466.

Magliulo P., Di Lisio A., Russo F., Zelano A., 2008. Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: a case study in southern Italy. *Earth and Environmental Science*, vol. 47, n. 3, pp. 411-435.

Malinverno A., e Ryan B.F., (1986). Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as a result of arc migration driven by sinking of the lithosphere. *Tectonics*, 5, 227- 245.

MATTM website, 2012. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare <http://www.pcn.minambiente.it/catalogo/>.

Mensa D. L., 1991. High resolution radar cross-section imaging – Hartech House, Norwood.

Migliorini C., 1937. Cenno sullo studio e sulla prospezione petrolifera di una zona dell'Italia meridionale. *II Congr. Mondiale Petrolio*, Parigi, 1-11.

Moretti M., Gallicchio S., Spalluto L., Ciaranfi N., Pieri P., 2010. Evoluzione Geologica del settore settentrionale del Tavoliere di Puglia (Italia Meridionale) nel Pleistocene medio e superiore. *Il Quaternario*, 23, 181-198.

Mostardini F., Merlini S., 1986. Appennino centro meridionale. Sezioni geologiche e proposta di modello strutturale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 35, 177-202.

Ortolani F., Torre M., Russo B. & Di Nocera S., 1979. Depositi altomiocenici del bordo settentrionale della Piana del Sele (Campania). *Boll. Soc. Geol. It.*, 98, 3-14.

Parotto M., Praturlon A., 2004. The southern Apenninic arc. In: *Geology of Italy Special Volume of the Italian Geological Society for the IGC 32 Florence-2004*, 33-58.

Patacca E., Sartori R., Scandone P., 1990. Tyrrhenian Basin and Apenninic arcs: kinematic relations since late Tortonian times. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 45, 425-451.

Patacca E., Scandone P., 2004. The Plio-Pleistocene thrust belt-foredeep system in the southern Apennines and Sicily. In: *Geology of Italy* (ed. U. Crescenti, S. D'Offizi, S. Merlino, L. Sacchi) *Special Volume of the Italian Geological Society for the IGC 32 Florence-2004*, 93-129.

Patacca E., Scandone P., 2007. *Geology of the Southern Apennines*. *Bollettino della Società Geologica Italiana, Special Issue 7*, 75-119.

Pescatore T., Di Nocera S., Matano F., Pinto F., 2000. L'Unità del Fortore nel quadro della geologia del settore orientale dei Monti del Sannio (Appennino meridionale). *Boll. Soc. Geol. It.*, 119, 587-601.

Petrucci O., Versace P., 2005. *Frane e alluvioni in provincia di Cosenza agli inizi del '900: ricerche storiche nella documentazione del Genio Civile*, Editoriale Bios, Cosenza (Italy), ISBN: 88-7740-391-8, 172 pp.

Pieri P., Sabato L., Tropeano M., 1996. Significato geodinamico dei caratteri deposizionali e strutturali della Fossa bradanica nel Pleistocene. *Mem. Soc. Geol. It.*, 51, 501-515.

Prati C., Rocca F., Giancola D., Monti Guarnieri A., 1998. Passive geosynchronous SAR system reusing backscattered digital audio broadcasting signals. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 36, n. 6, pp. 1973-1976.

Ricchetti G., 1975. Nuovi dati stratigrafici sul Cretaceo delle Murge emersi da indagini nel sottosuolo. *Boll. Soc. Geol. It.*, 94 (3), 1013-1108.

Schiattarella M., Beneduce P., Di Leo P., Giano S.I., Giannandrea P., Principe C., 2005. Assetto strutturale ed evoluzione morfotettonica quaternaria del vulcano del Monte Vulture (Appennino Lucano). *Boll. Soc. Geol. It.*, 124, 543-562.

Sella M., Turci C., Riva A., 1988. Sintesi geopetrolifera della Fossa bradanica (avanfossa della catena appenninica meridionale). *Mem. Soc. Geol. It.*, 41, 87-107.

Selli R., 1962. Il Paleogene nel quadro della geologia dell'Italia meridionale. *Mem. Soc. It.*, 3, Roma.

Spalluto L., Pieri P., Ricchetti G., 2005. Le facies carbonatiche di piattaforma interna del Promontorio del Gargano: implicazioni paleoambientali e correlazioni con la coeva successione delle Murge (Italia meridionale, Puglia). *Boll. Soc. Geol. It.*, 124, 675-690.

Spalluto L., Pieri P., 2008. Carta geologica delle unità carbonatiche mesozoiche e cenozoiche del Gargano sud-occidentale: nuovi vincoli stratigrafici per l'evoluzione tettonica dell'area. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, LXXVII, 147-176.

Tarchi D., Casagli N., Fanti R., Leva D., Luzi G., Pasuto A., Pieraccini M., Silvano S., 2003a. Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy.

Engineering Geology, vol. 68, nn. 1-2, pp. 15-30, (CNR GNDCI Pub. No. 2484).

Tarchi D., Casagli N., Leva D., Luzi G., Moretti S., Pieraccini M., Sieber A. J., 2003b. Monitoring landslide displacements by using ground-based SAR interferometry: application to the Ruinon landslide in the Italian Alps. Journal Geophysical Research, vol. 108, n. 6, (CNR GNDCI Pub. No. 2510).

TELE-RILEVAMENTO EUROPA, 2008. PSInSARTM – Manuale d'uso-Tele-Rilevamento Europa, T.R.E. s.r.l., pp. 4-84.

Tropeano M., Sabato L., Pieri P., 2002. Filling and cannibalization of a foredeep: the Bradanic Trough (Southern Italy). In “Sediment Flux to Basins: Causes, Controls and Consequences” (Jones, S.J., and Frostick, L.E., Eds.), Geol. Soc. London, Spec. Publ. 191, 55-79.

Vai G.B., Martini P., 2001. Anatomy of an Orogen: the Apennines and Adjacent Mediterranean Basins. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1-632.







