

Primi risultati dal confronto tra tecniche geomorfologiche convenzionali e l'interferometria Difsar: applicazione per l'analisi di movimenti in massa in aree peri - urbane (Calabria, Italia)

Tonino Caracciolo¹, Tiziana La Pietra², Annamaria Pellegrino²

¹Centro Cartografico Regionale- Regione Calabria-Lametia Terme (Italy) 0968444452; am_geo@yahoo.it

²Autorità di Bacino Regionale, Regione Calabria-Catanzaro (Italy), tel. 3334508211/0984982298, an.pellegrino@regcal.it; ti.la.pietra@regcal.it

Titolo in Inglese

ABSTRACT: The study reported in this paper is focused in two different sites Acri and S. Luca, which are representative of typical geological contexts of the Calabrian Arc. Important and hazardous processes and different landforms have been identified in the studied areas. They are indeed related to both the peculiar characters of many landslides and Deep Seated Gravitational Slope Deformation (DSGSD) with an associated "large landslide" (Serra di Buda) next to Acri City and the numerous complex landslides (roto-traslative and slow flow movements) placed in S. Luca City. This paper reviews the results obtained by means conventional and innovative geomorphological methods, which are based on Aerial-photo analysis, historical data about mass movement failure and DIF-SAR Interferometry. Aerial-photos analysis was carried out through different chronometric high resolution photographs. Radar imagery technique, due to Differential Interferometry (DIF-SAR), has provided multi-year data sets of ERS SAR, with high resolution and long temporal coverage, for detecting and monitoring the mass movements of the investigated unstable slopes. The gauging of the adopted methodical analysis has tested and validated Dif-Sar data through the challenge with the conventional geomorphological methods. Paper reviews first outcomes for the assessment of the practical advantages and limitations of this experimental Earth Observation technique in connection with two different geological-evolutionary settings in peri-urban areas. The whole collected data have provided a contribute either for validating the evolutionary hypothesis of slopes or an overview of the geological-evolutionary model of *the investigated mass movements*.

Key terms: landslides; Conventional Geomorphological Techniques; Dif-Sar Interferometry; Calabria

Termini chiave: Franosità; Tecniche geomorfologiche convenzionali; Interferometria DIFSAR; Calabria

Riassunto

Lo studio proposto nel presente lavoro si riferisce ai siti di Acri e San Luca, rappresentativi di due diversi contesti geologici, tipici dell'Arco Calabro. Processi morfoevolutivi ad elevata pericolosità e differenti evidenze geomorfologiche sono stati individuati nelle aree di studio. Essi sono connessi sia ai peculiari caratteri della Deformazione Gravitativa Profonda di Versante con associata la grande "frana di Serra di Buda" e numerose frane per scorrimento in prossimità dell'abitato di Acri, sia alle numerose frane roto-traslative e colate lente localizzate nel centro abitato di San Luca.

Il presente lavoro propone alcuni risultati ottenuti tramite l'applicazione di metodi geomorfologici innovativi e convenzionali, basati sull'analisi aerofotointerpretativa, dati storici e interferometria DIF-SAR. L'analisi delle foto-aeree è stata condotta a scala multitemporale tramite l'uso di fotogrammi ad elevata risoluzione. La tecnica delle immagini radar, connessa all'interferometria differenziale

(DIF-SAR), ha permesso di ottenere una serie di dati ERS SAR, con alta risoluzione ed una estesa copertura multi-temporale, per analizzare e monitorare i fenomeni franosi dei versanti investigati. Le risultanze della metodologia di analisi adottata hanno testato e validato i dati Dif-Sar attraverso il confronto con metodi geomorfologici convenzionali. Il lavoro propone, infatti, i primi risultati per la stima dei vantaggi pratici e delle limitazioni di tale tecnica sperimentale applicata in aree caratteristiche di due diversi contesti geologico-evolutivi.

Introduzione

Nell'ultimo decennio l'impiego di tecniche sperimentali innovative per lo studio dei processi morfoevolutivi ha ottenuto validi risultati per il controllo e lo sviluppo del paesaggio, connesso ai differenti tipi di frane.

Lo studio di seguito proposto si riferisce ai siti di Acri e San Luca, situati rispettivamente in prossimità del margine occidentale del Massiccio della Sila e sul versante Ionico

del Massiccio dell'Aspromonte. In tali aree, la presenza di una diffusa e complessa franosità ha condotto a ricerche multidisciplinari e alla messa a punto di un complesso sistema di monitoraggio (Amaro et alii, 2004; Caracciolo et alii, 2006; La Pietra et alii, 2004).

In particolare, il presente lavoro, partendo da una fase conoscitiva e di raccolta di dettagliati elementi geologici e geomorfologici sui siti in studio, propone la diagnosi e la verifica dei dati DIF-SAR, attraverso una complessa fase di analisi e sintesi dei relativi dati di output.

Quadro geologico

L'Arco Calabro è costituito da una serie di falde cristalline pre-Mesozoiche messe in posto nel Miocene inferiore (Messiniano) durante l'orogenesi alpina (Vai, 1992). In Calabria settentrionale tali falde, costituite da rocce granitiche, ofiolitiche e metamorfiche, sia di basso che di alto grado, sono sovrascorse sui terreni sedimentari della Catena appenninica; in Calabria meridionale, le unità granitiche e metamorfiche compongono i rilievi dell'Aspromonte e delle Serre.

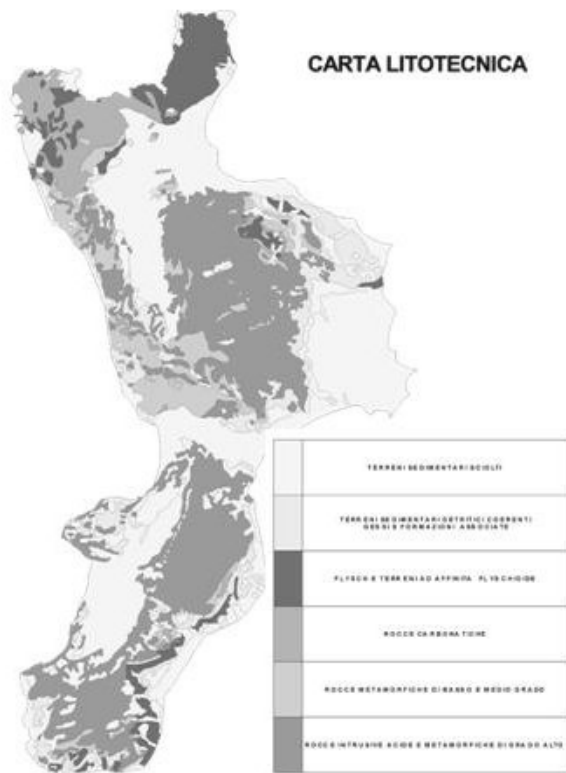


Figura 1: Inquadramento dei siti in studio.
Figure 1: Location of the investigated areas.

L'abitato di Acri (600-750 m s.l.m.; Fig.1) è collocato in prossimità del margine occidentale della Sila Grande. In questo settore le faglie normali ad andamento N-S formano nel complesso un sistema a gradinata ribassato verso

occidente, che culmina in una importante direttrice tettonica regionale. Lungo tale direttrice i litotipi cristallino-metamorfici vengono sollevati e giustapposti ai depositi plio-pleistocenici, che colmano la depressione tettonica della Valle del Crati (Tansi & Greco, 2001). L'area in esame (La Pietra et alii, 2004) è caratterizzata dalla diffusa presenza di gneiss e scisti biotitici intrusi da masse granitiche e granodioritiche (Paleozoico), appartenenti alle due Unità sovrapposte di Polia-Copanella e Monte Gariglione. Le rocce sono caratterizzate da un elevato grado di fratturazione ed alterazione. Sul basamento Paleozoico poggiano in trasgressione terreni sedimentari di età olocenica, costituiti da conglomerati fluviali antichi e conglomerati sabbiosi con sottili intercalazioni argillose, che affiorano prevalentemente nella depressione occupata dall'insediamento urbano di Acri.

San Luca (Fig. 1; La Pietra et alii, 2004) sorge nella parte bassa del bacino della Fiumara Bonamico. L'assetto geologico dell'area è caratterizzato da un importante contatto tettonico che abbassa il settore sud-orientale (Plio-Pleistocene). A nord-ovest del contatto affiora il Flysch di Capo d'Orlando (Miocene inferiore; Bonardi et alii 1980) su cui sorge il Centro storico, mentre a sud-est prevale la coltre alloctona delle Argille Varicolori, stratigraficamente in sovrascorrimento sul Flysch, su cui si sviluppa l'area in espansione. I depositi silico-clastici della serie miocenica sono costituiti da alternanze conglomeratico-arenacee e pelitiche, da mediamente a notevolmente cementate e fratturate. Le argille varicolori appaiono come un Mélange estremamente caoticizzato ed alterato nel quale sono collocati olistoliti e serie di sedimenti caotici clastici. Sulle argille poggiano lembi residui di un conglomerato terrazzato quaternario continentale. Al contatto tra le Argille ed il Flysch, su cui sorge parte del vecchio abitato, si individua un esteso accumulo di materiale detritico, formatosi a seguito di antichi movimenti franosi che coinvolgono il Flysch.

Fonti storiche

Al fine di ricostruire il profilo storico del comportamento delle frane, le serie temporali delle stesse, la loro localizzazione spaziale e quindi gli scenari di rischio per i due siti in studio, è stata condotta un'accurata analisi delle fonti storiche (ABR, 2001). L'eterogeneità di tali fonti ha indotto, in primo luogo, ad effettuare una valutazione delle informazioni in base alla loro attendibilità e precisione. Per quanto concerne l'abitato di S. Luca, le prime notizie su eventi di dissesto si hanno a partire dagli inizi del Novecento (Almagià, 1910). In una sintesi sulle grandi frane in Italia, divise per tipologia e meccanismi d'innescio (eventi alluvionali e terremoti), si evidenziano, infatti le ampie aree franose lungo la fiumara Buonamico a monte di S.Luca. Prime notizie sui dissesti che hanno interessato invece l'abitato si hanno a seguito della seconda alluvione del 1939 (Montanari, 1939). La permanenza di situazioni di

rischio molto elevato, connesso a movimenti franosi tali da comportare interventi di consolidamento o addirittura di trasferimento dell'abitato, è segnalata fino al 1963 (Catenacci, 1992). E' solo nel 1973 che vengono condotti studi mirati e di maggior dettaglio sulla franosità dell'abitato di S. Luca (ABR, 2001), soprattutto a seguito dei numerosi danni provocati dai disastrosi eventi alluvionali del 1972-1973. I fenomeni franosi e le numerose evidenze morfologiche ad essi associati hanno interessato, in particolare, sia il centro storico di S. Luca che la zona di nuova espansione poco più a valle e diverse località limitrofe. Relativamente al centro storico, si sono innescati numerosi crolli nel complesso miocenico e scorrimenti nella potente coltre di materiale detritico, soprattutto, nel settore occidentale del vecchio abitato, con sviluppo di scarpate e di un diffuso sistema fessurativo con trend NS all'estremità ovest del paese ed EW al centro. Nella zona d'espansione è stata rilevata una diffusa franosità tendenzialmente complessa con un arretramento delle scarpate di frana, come in località Calvario e Martorano. A questa documentazione si aggiungono altresì segnalazioni più recenti in merito a riattivazioni e conferme sullo stato dei luoghi, effettuate nel corso della redazione del Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico per la Regione Calabria (ABR, 2001). Molta documentazione è stata reperita circa le aree interessate dai movimenti franosi del Comune di Aciri. Esse, in linea generale, mostrano fasi di intensa attività intervallate da lunghi periodi di relativa stabilità. Nelle varie fonti vengono riportate notizie sui principali fenomeni franosi, noti già a partire dal XVIII secolo e inerenti principalmente le località Padia - San Cataldo, Vallone San Leonardo e Calvario-Serra di Buda.

Come riportato in Almagià (1910) il primo movimento documentato della frana di Padia risale al 1 dicembre 1708, con importanti riattivazioni nel novembre 1860 e gennaio 1894 che produssero la distruzione di molte case. La sua recente attività viene, invece, confermata in almeno due rapporti di sopralluogo del 1992 e 1999 e segnalata in fonti giornalistiche del 2001 (ABR, 2001). Le prime notizie circa la frana che si sviluppa lungo il Vallone San Leonardo (Almagià, 1910), sul versante esposto a sud, risalgono al gennaio 1870 anche se non è da escludere che si tratti di un fenomeno ben più antico: "anzi non è improbabile che il vallone stesso si sia formato nella nicchia generatasi nel luogo di distacco della frana". Altri movimenti che hanno prodotto danni ad alcune case di Aciri si sono verificati nel gennaio 1884. In seguito, sono stati segnalati esclusivamente scorrimenti di materiale lungo i fianchi del vallone, particolarmente attivi nella porzione sinistra della corona e della scarpata principale di frana; tali scorrimenti hanno prodotto lesioni ad alcuni fabbricati del paese.

Riguardo la frana di Serra di Buda sono state individuate diverse fasi di pronunciata instabilità, alcune della durata di qualche anno, separate da periodi di quiescenza variabili da 6-7 anni a 20-30 anni. Il primo movimento documentato risale al Novembre 1708, seguito da replicati movimenti

risalenti al febbraio 1811, al dicembre 1833, al novembre 1840, all'ottobre 1872, al febbraio 1897, al 1908 e all'autunno 1914. Successivamente, la documentazione reperibile testimonia la riattivazione della frana, con coinvolgimento della strada Aciri - Bisignano, nell'inverno 1944-1945, dicembre 1980, novembre 1984, aprile 1985, marzo 1996 ed infine gennaio 1997 e dicembre 1998 (Antronico, 2001). A partire da tale data la riattivazione prosegue, registrando minore velocità nei mesi estivi con un sostanziale incremento nel periodo invernale (Gennaio-Marzo), come si evince anche dai dati GPS acquisiti nel 2004-2005 (La Pietra et alii, 2004; 2005).

Caratteri geomorfologici dei siti in studio

La metodologia adottata per l'individuazione delle aree in frana si è basata sull'analisi di foto aeree a diversa scala nominale da 1:33.000 (Volo IGM 1954/55 e 1990-95) a 1:18.000 (Volo SCAME 1979-81) e 1:15.000 (Volo Calabria CGR 2001), sulla raccolta di informazioni dirette ed indirette e su un puntuale rilevamento geomorfologico di verifica.

Il territorio di Aciri costituisce un ambiente in cui il modellamento del rilievo avviene mediante processi gravitativi di ampie proporzioni (Fig. 2), a causa dell'elevata energia di rilievo, della topografia estremamente accidentata, con pendenze che superano largamente i 30°, e delle scarse proprietà meccaniche delle rocce affioranti. La maggior parte di tali processi tende a riattivarsi in concomitanza di eventi meteorici particolarmente intensi e/o prolungati o in caso di sollecitazioni sismiche. Tali fenomeni coinvolgono le aree adiacenti il centro abitato e, in particolare, interessano le località Padia - San Cataldo, Calvario-Serra di Buda ed il Vallone San Leonardo (Fig. 2), zone più rappresentative della franosità del territorio di Aciri sia per la tipologia che per l'attività dei fenomeni di instabilità presenti.

La frana complessa di Padia è da ricondurre ad uno scorrimento, a prevalente componente rotazionale, interessato alla base da fenomeni di crollo per lo scalzamento operato dal Torrente Calamo. Si tratta di un fenomeno piuttosto profondo che interessa tutto il versante.

Il fenomeno franoso che si sviluppa lungo l'intero Vallone S. Leonardo è riconducibile nel suo insieme ad uno scorrimento, con componente traslativa predominante, in continua evoluzione. Attualmente l'attività si concentra prevalentemente nella zona di corona con scorrimenti superficiali di materiale detritico che alimenta una conoide nel fondovalle del T. Mucone.

Lungo il versante in destra orografica del Torrente Calamo è presente un importante fenomeno deformativo profondo (DGPV) a cui si associa una diffusa franosità (Fig. 2). Fra i diversi fenomeni associati, è stato individuato un movimento profondo noto come "frana di Serra di Buda". Il fenomeno franoso è riconducibile, nel suo insieme, ad uno scorrimento con predominante componente

traslativa. Le manifestazioni più evidenti del movimento si hanno sia nella porzione di monte della frana, sia nella fascia posta a minor quota. Nel settore di monte si rilevano, per circa 200 m, deformazioni e fratture in continuo sviluppo lungo l'importante asse viario costituito dalla S.S. 660, nonché alcune scarpate e nicchie di distacco. La parte

inferiore del versante, in corrispondenza di una più accentuata pendenza del rilievo, è interessata, invece, da almeno due fenomeni franosi tipo crollo. La parte mediana è caratterizzata da morfologie sub-pianeggianti, che in alcuni casi corrispondono a terrazzi di frana talora in contropendenza.

Figura 2- Quadro geomorfologico di Acri

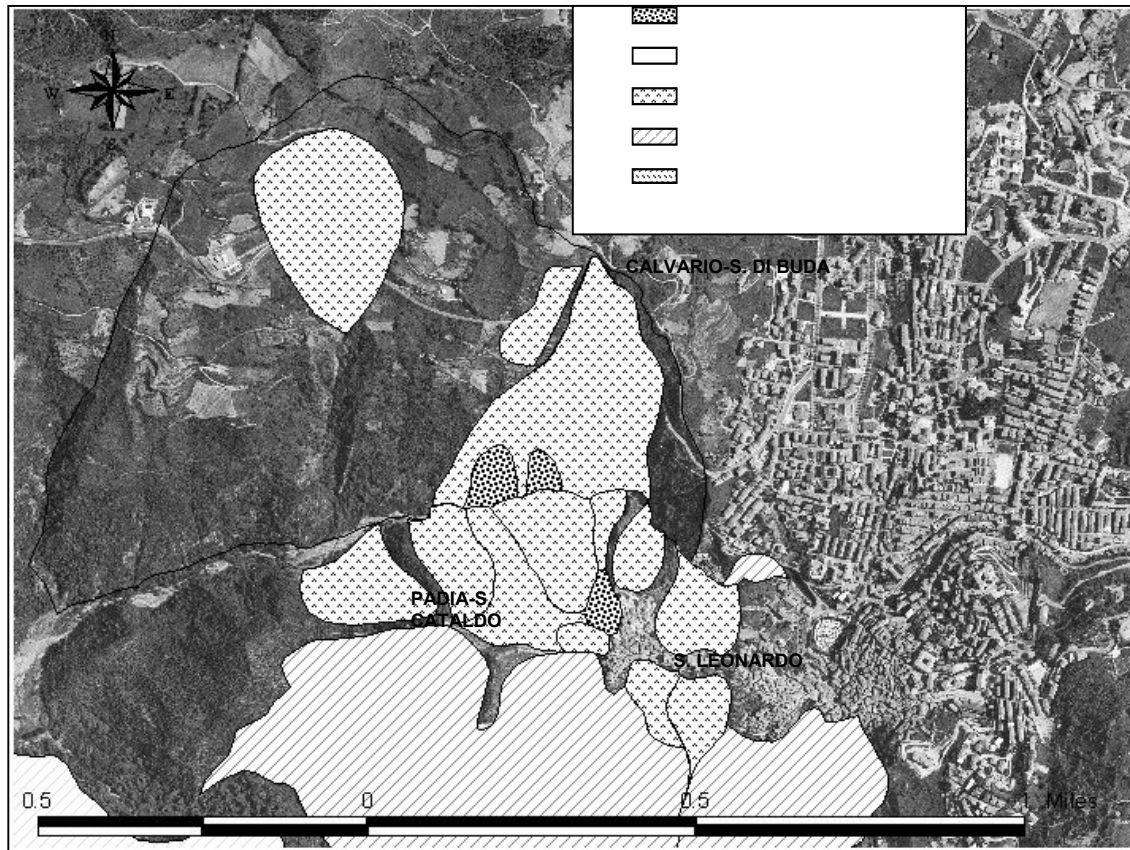


Figure 2- Geomorphological sketch of Acri.

L'assetto orografico dell'abitato di S. Luca (Fig.3) è caratterizzato da due grandi settori con differenti lineamenti morfologici, separati da una zona di raccordo costituita dai depositi di frana. Si individua un settore a morfologia aspra (230-400 m s.l.m.), a nord del centro storico, caratterizzato da un'elevata energia di rilievo, da versanti acclivi (100%) solcati da valli strette e profonde, ed un settore collinare a sud-est, dove si sviluppa il nuovo centro abitato, con morfologia blanda (15%). Il primo settore è interessato da fenomeni franosi in roccia, quiescenti ed attivi. Le tipologie di movimento sono da ricondurre essenzialmente a crolli e/o scorrimenti roto-traslativi nei depositi sedimentari miocenici, con successiva canalizzazione del detrito, e a scorrimenti più o meno superficiali, che interessano la coltre detritica della zona di raccordo. Questi ultimi sono ubicati prevalentemente lungo la zona del cimitero ed il lato sudovest del vecchio centro abitato. Riguardo all'abitato, i rilievi condotti, grazie anche alle analisi dei danni su alcuni edifici e all'esistenza di numerose fratture, indicano un

meccanismo di rottura per scorrimento tendenzialmente con distacchi successivi ed in arretramento, con forte azione di richiamo verso monte. Il secondo settore è caratterizzato, invece, da un dissesto diffuso in cui si hanno in prevalenza fenomeni di scorrimento rotazionale e/o traslazionale evolvuti a luoghi in colate lente. Questi sono in gran parte attivi ed in alcuni tratti la distinzione dei singoli corpi di frana è difficile per il ripetersi ed il sovrapporsi di fenomeni di dissesto ed interventi antropici. I margini di tale settore formano, spesso, ripidi gradini nei depositi conglomeratici miocenici che retrocedono per crollo e/o scorrimento per arretramento dei movimenti in massa nelle sottostanti argille, come avviene per i fenomeni franosi in località Carosello e Martorano. Relativamente a quest'ultimo, è stato individuato un esteso fenomeno principale a cui è associato un fenomeno secondario; entrambi sono attivi sin dal 1954, sebbene all'epoca, lungo la porzione destra della corona del fenomeno principale siano state posizionate delle gabbionate. A seguito dell'evento alluvionale del 1972, è

stato realizzato un muro su pali a valle della corona principale, che ad oggi sembra aver favorito definitivamente la sua stabilizzazione a monte. Una ripresa dell'attività deformativa si localizza, invece, lungo il fianco destro del fenomeno principale ed in corrispondenza di quello secondario. Analoghi interventi sono stati condotti in

località Calvario e Carosello. Nonostante la presenza di opere di mitigazione, le evidenze morfologiche e gli indicatori cinematici mostrano il notevole impatto da parte dei movimenti in massa ubicati nelle tre suddette località sull'abitato.

Figura 3- S. Luca : quadro geomorfologico.

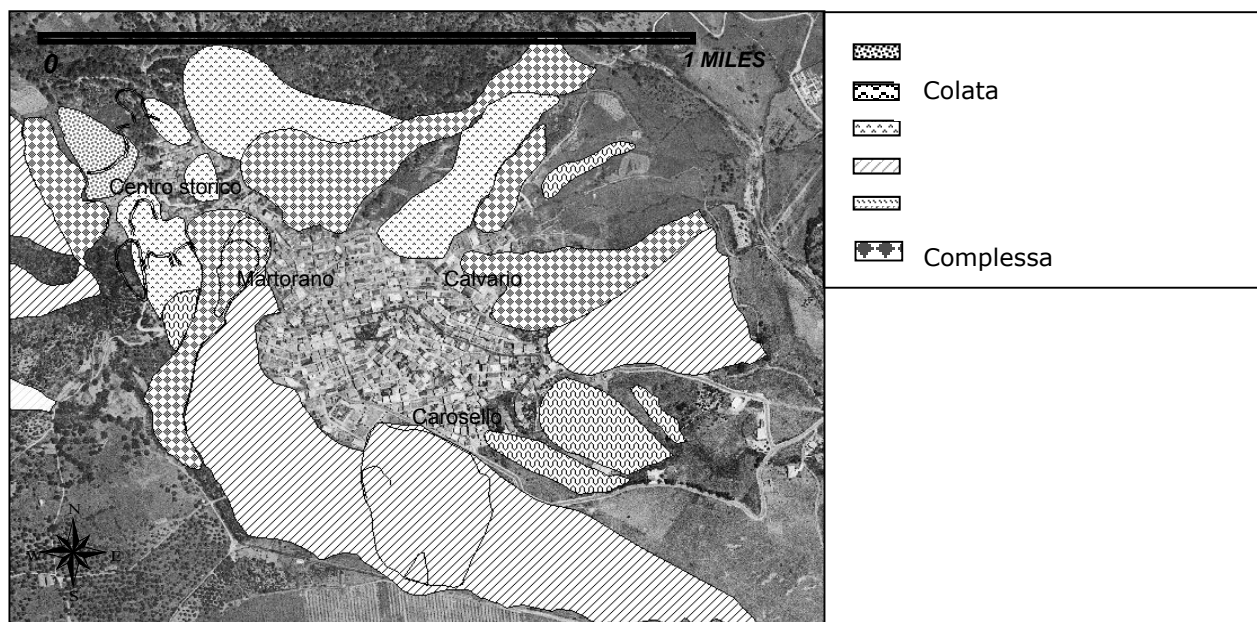


Figure 3- S. Luca: geomorphological sketch.

Interferometria DIF-SAR

La tecnica dell'interferometria differenziale (DIF-SAR) "classica" consiste nella realizzazione di un interferogramma (mappa della differenza di fase) da una coppia di acquisizioni SAR e nella successiva traduzione di questo in una "mappa" completa degli spostamenti. Tale tecnica si basa sui seguenti principi di base. La differenza di fase tra due immagini SAR complesse della scena in esame, acquisite dalla stessa posizione in tempi differenti, contiene due termini legati, rispettivamente, alla topografia e allo spostamento del suolo. Al fine di isolare il contributo relativo allo spostamento avvenuto tra i due istanti di acquisizione, la componente topografica viene stimata per mezzo di un DEM (mappa numerica di elevazione) o di una coppia interferometrica tandem (intervallo temporale fra le due acquisizioni tale da poter assumere spostamento nullo). L'accuratezza del risultato è strettamente legata alla qualità del DEM, alla precisione dei dati orbitali e alla condizione di utilizzare coppie interferometriche con baseline ridotte (differenza fra le posizioni dei sensori durante le due acquisizioni). Tanto è minore la baseline tanto più il contributo topografico è ridotto ed al limite per baseline nulla si osserva il solo spostamento. La geometria di

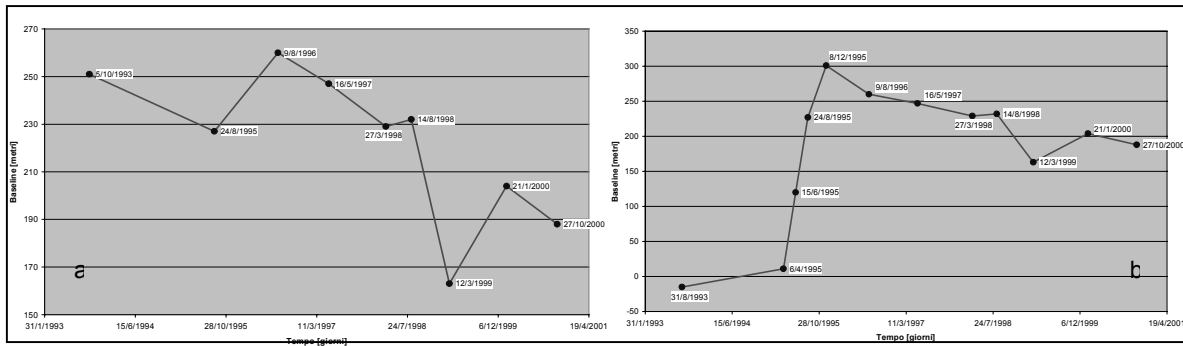
osservazione di un SAR è caratterizzata da due assi principali: la direzione di volo e quella di vista. In particolare sui sensori montati sui satelliti ERS 1-2 queste due direzioni sono ortogonali (geometria zero-Doppler) e, inoltre, la direzione di vista presenta un'inclinazione media di 23° rispetto al nadir. L'oggetto della misura interferometrica è lo spostamento misurato lungo la linea di vista del sensore radar. Il segno positivo della misura interferometrica indica un allontanamento. Nel caso di aree piane, invece la misura si discosta di meno del 10% dal valore del movimento verticale.

Attraverso una catena completa di processamento per l'interferometria differenziale messa a punto dall'Agenzia Telespazio (Caracciolo et alii, 2006), sono state ottenute una serie di dati ERS SAR, con alta risoluzione ed una estesa copertura multi-temporale, permettendo di avere mappe di spostamento e di velocità lungo la linea vista. Oltre alla misura interferometrica, Telespazio ha fornito una sua possibile interpretazione come spostamento lungo la linea di massima pendenza (*slope*), per mezzo di un coefficiente legato all'angolo formato tra la direzione di vista del sensore e quella di massima pendenza del terreno. La scalatura è stata effettuata solo per terreni con pendenze superiori a 4° assumendo, invece, che la direzione di movimento

dominante fosse quella verticale per terreni con pendenze inferiori. Sono stati inoltre mascherati i punti per cui l'angolo formato fra la direzione di vista e quella di massima pendenza fosse compresa fra 78° e 102° , in quanto le due direzioni sono quasi ortogonali e non è quindi possibile determinare lo spostamento lungo la massima

DIFSAR è in ogni caso relativa.

Relativamente al criterio temporale, non si è andato oltre il 2001 per problemi d'acquisizione del satellite ERS-2. Le scene totali acquisite ed elaborate sono 77, rispettivamente 38 per San Luca e 39 per Acri. Per analizzare l'evoluzione temporale degli spostamenti è stato necessario scegliere un



pendenza a partire dalla misura lungo la linea di vista del sensore. La misura di spostamento effettuata con la tecnica

insieme opportuno di coppie interferometriche, selezionando quelle con migliore coerenza (Fig. 4).

Figura 4-Copie interferometriche utilizzate: a) San Luca; b) Acri.
Figure 4-Adopted interferometric twins: a) San Luca; b) Acri.

Discussione dati

Dall'analisi fotointerpretativa e dei dati storici è emersa una condizione di attività dei dissesti siti in località Martorano, Calvario e Carosello già a partire dal 1954. Tale stato è ancora ben riconoscibile tramite l'analisi del volo 1978, in cui si individuano anche elementi morfologici in merito al dissesto sito nella parte sud-ovest dell'abitato e di crollo da Pietra Saracena, attivatisi a seguito dell'evento alluvionale del 1972-1973. Il procedere dell'analisi da fotointerpretazione ha evidenziato una perdita della significatività delle evidenze morfologiche per i dissesti in studio, ad eccezione di quelli siti in località Carosello e Martorano, ben riconoscibili fino al 2001. In tali siti, infatti, l'assenza e/o la parziale influenza antropica tendono a non mascherare o alterare i processi morfoevolativi in atto.

Relativamente al fenomeno del vecchio centro abitato, sebbene di difficile individuazione tramite fotointerpretazione per l'intensa urbanizzazione dell'area, i dati di output dell'analisi DIF-SAR (lungo la linea vista) hanno confermato i dati storici ed i rilevamenti in situ. Si tratta di un fenomeno che mostra una distribuzione e valori delle deformazioni disomogenei all'interno dell'area in frana, connessi sicuramente alla presenza di diverse scarpate e ad uno stile successivo. Tale assetto è confermato da un generale arretramento dell'area in deformazione che, dalla porzione medio-bassa del versante (concentrazione delle deformazioni nel periodo 1993-1997) si propaga verso monte fino ad una ripresa dell'attività della scarpata principale (deformazioni di circa 1 cm a partire dal 1998). Complessivamente, sono stati registrati un più alto tasso di deformazione tra il 1997 ed il 1998, che procede in modo costante fino al 2000 (Fig. 5a), nonché maggiori

deformazioni lungo il fianco destro e nella porzione medio-bassa, lungo le scarpate secondarie.

Le mappe di deformazioni e velocità slope (1993-2000) hanno indicato un'attività concentrata in corrispondenza del fianco destro e nel medio-basso corpo di frana (Tab.1).

Relativamente ai complessi fenomeni di Carosello e Martorano è stata verificata una congruenza dei dati ottenuti dai diversi approcci di analisi. In loc. Martorano, il fenomeno principale presenta a partire dal 1997-1998 deformazioni lungo il suo lato destro (scarpata e fianco) con un tasso tendenzialmente costante (Fig. 5b). Secondo l'interpretazione slope, esse arrivano fino a 6,5 cm (Tab.1). L'attività deformativa, che mostra un rallentamento a fine 2000, tende ad aumentare progressivamente verso la porzione centrale dell'area in frana, probabilmente perché influenzata dal fenomeno secondario di colata superficiale ad essa associato. Analoghi risultati, sia sull'entità delle velocità che delle deformazioni, sono stati ottenuti anche per quest'ultimo (Fig. 5c). Sebbene si registri un tasso di deformazione costante a partire dal 1998, i massimi valori delle deformazione si hanno nel 1997-1998 e a fine 2000. Quest'ultimo dato costituirebbe un effetto degli eventi alluvionali del settembre 2000. Lungo la linea di massima pendenza si registrano deformazioni ben distribuite in tutta l'area in frana (Tab.1).

Le mappe lungo la linea di vista in loc. Carosello hanno dato informazioni solo sull'area del coronamento, in particolare lungo il lato sinistro. Nonostante qualche picco di deformazione già tra il 1997-1998, deformazioni tollerabili si hanno in realtà nell'arco temporale 1999-2000 (Fig. 5d). Analogamente, le deformazioni slope risultano concentrate lungo il coronamento (Tab.1).

Tabella 1- Principali dati di output lungo la linea di massima pendenza.
 Table 1-Main slope output data

INTERFEROMETRIA-SLOPE		VELOCITA' (mm/anno)	SPOSTAMENTO MASSIMO 1993-2000 (cm)
<i>distribuzione nell'area in frana</i>			
CENTRO STORICO	fianco destro (1993-2000)	5-10	
	medio-basso corpo di frana (1993-2000)	da 10 a maggiori di 13	> 7,5
MARTORANO	fianco destro (1997-2000)	da 10 a maggiori di 13	6,5
MARTORANO SECONDARIO	coronamento e progressivo aumento nella porzione centrale dell'area in frana (1997-2000)	5 con picchi di 10 o maggiori di 13mm	6
CAROSELLO	coronamento e progressivo aumento nella sua porzione sinistra (1993-2000) con picchi nel 1998-2000	da 5 a 10, con picchi > 13	> 7,5
CALVARIO	No data	No data	No data
V.NE S. LEONARDO	coronamento e progressivo diminuzione nella porzione centrale dell'area in frana (1996-2000)	da 10 a maggiori di 13, con minimi di 5	7
PADIA- CATALDO	No data	No data	No data
SERRA DI BUDA	No data	No data	No data
DGPV	coronamento (1996-2000)	da 10 a maggiori di 13	> 7,5

In località Calvario, la tecnica DIF-SAR ha fornito dati confrontabili con le numerose segnalazioni in merito ad una ripresa dell'attività dei fenomeni (Archivio ABR, 2001). In corrispondenza del fenomeno più esteso sono state osservate deformazioni concentrate principalmente lungo il fianco destro (già a partire dal 1996) e nella parte medio-alta del corpo di frana, a ridosso delle opere di mitigazione. Dati ammissibili sul quadro deformativo complessivo si hanno a partire dall'arco temporale 1997-1998 come confermano i valori di deformazione massima registrati (Fig.5e); le velocità di deformazione da 5mm/anno (1996-1998) arrivano a 10 mm/anno (1998/2000). Con l'avanzare del tempo (1998-2000) è stato osservato anche un progressivo coinvolgimento della zona di scarpata e corona di frana (Fig. 5e) con velocità di circa 5 mm/anno. Relativamente al fenomeno di colata superficiale di minori dimensioni, le mappe hanno evidenziato deformazioni nella zona del coronamento, con un forte richiamo a monte. Sebbene si registrino picchi di deformazione di circa 1 cm nel periodo 1997-1998, i dati di output evidenziano un'inconfutabile attività deformativa a partire dal 1998-1999, con velocità di deformazione di 7,5 mm/anno nell'arco temporale 1998-2000 (Fig. 5f). Il trend deformativo cresce costantemente verso la fine del 2000 e potrebbe essere associato agli effetti degli eventi alluvionali del 2000. Le mappe slope in località Calvario non hanno dato risultati a causa dei problemi geometrici di acquisizione di cui sopra (Tab.1).

Relativamente ai dissesti siti nell'abitato di Acri, dati storici e soprattutto da fotointerpretazione indicano la sostanziale continua attività dello scorrimento che si sviluppa lungo il Vallone San Leonardo. Per tale frana infatti, più che di fasi parossistiche intervallate da periodi di stasi, si tratta di una maggiore o minore intensità delle

stesse. Lo stato di attività del fenomeno viene confermato anche dai dati interferometrici (Fig.6a) che mostrano deformazioni concentrate lungo la zona di coronamento e tendenzialmente costanti nel periodo 1996-2000, con picchi nel 1998 e a fine 2000. Analogamente, le deformazioni slope risultano concentrate lungo il coronamento e nella porzione centrale dell'area in faran (Tab.1).

Per quanto riguarda, invece, la frana di Padia-San Cataldo, occorre sottolineare che tanto l'analisi fotointerpretativa che l'esame delle fonti bibliografiche evidenziano una sostanziale attività della stessa nel corso degli anni, con particolare intensificazione tra la fine del 1998 ed il 2001. I fenomeni di riattivazione si concentrano particolarmente in prossimità della corona con scarpata principale quasi subverticale. Tali riattivazioni si concretizzano con lo scivolamento del materiale detritico ed il crollo di blocchi litoidi; esse sono anche testimoniate dalla presenza di blocchi rocciosi pericolanti, da vistosi abbassamenti (qualche decina di cm nell'arco di 2-3 mesi) di una sede viaria comunale, da lesioni ed evidenti fratture sulle abitazioni lambite dalla frana, nonché dal progressivo danneggiamento (1999) e rottura (2001) di alcune opere di consolidamento. L'analisi interferometrica, invece, non produce per questo fenomeno dati significativi. Ciò a causa di alcuni dei requisiti di base necessari per il processamento DIF-SAR, quali la geometria di acquisizione e la copertura boschiva. Solo nell'arco temporale 1997-2000 si registrano tracce di spostamento (0.2 cm) lungo la fascia di potenziale influenza a monte dell'area in frana, con picchi di 0,4 cm nel 2000.

In merito all'attività della DGPV, le mappe di spostamento lungo la linea vista mostrano deformazioni a partire dal 1998 e nell'arco temporale 1999-2000 (Fig. 6b); esse sono localizzate nella zona a monte della complessa

area in deformazione (settore NE) dove i dati-slope risultano maggiori di 7,5 cm a fine 2000. Circa la franosità associata alla DGPV non si hanno dati per il loro elevato tasso deformativo. Tuttavia, relativamente alla "frana di Serra di Buda", le mappe di spostamento hanno fornito dati solo nell'area posta a monte del dissesto, associate al forte detensionamento indotto per la riattivazione della grande frana (Fig. 6c). L'assenza di segnali all'interno di quest'ultima, sia lungo la linea vista che slope (no data > 13 mm/anno; Tab.1), è consequenziale alla mancanza di coerenza delle coppie interferometriche per la notevole

velocità di trasformazione e deformazione della stessa, come evidenziano le segnalazioni ed i dati raccolti nell'arco temporale 1998-2000, consolidati dall'attività di monitoraggio successiva (ABR 2001; La Pietra et alii, 2005). Lungo la fascia di detensionamento, le deformazioni registrate lungo la linea di vista (Fig. 6c) indicano che nei punti di maggior ampiezza il tasso di movimento osservato si aggira sui 2 cm in due anni con velocità di 5mm/anno (1998-2000). La stessa area è interessata, per un periodo di circa 1 anno (1998), da un'accelerazione del movimento, poi stabilizzatosi su velocità relativamente minori.

Figura 5- San Luca: dati di output lungo la linea vista; i valori di deformazione sono cumulati a partire dalla prima acquisizione (1993).

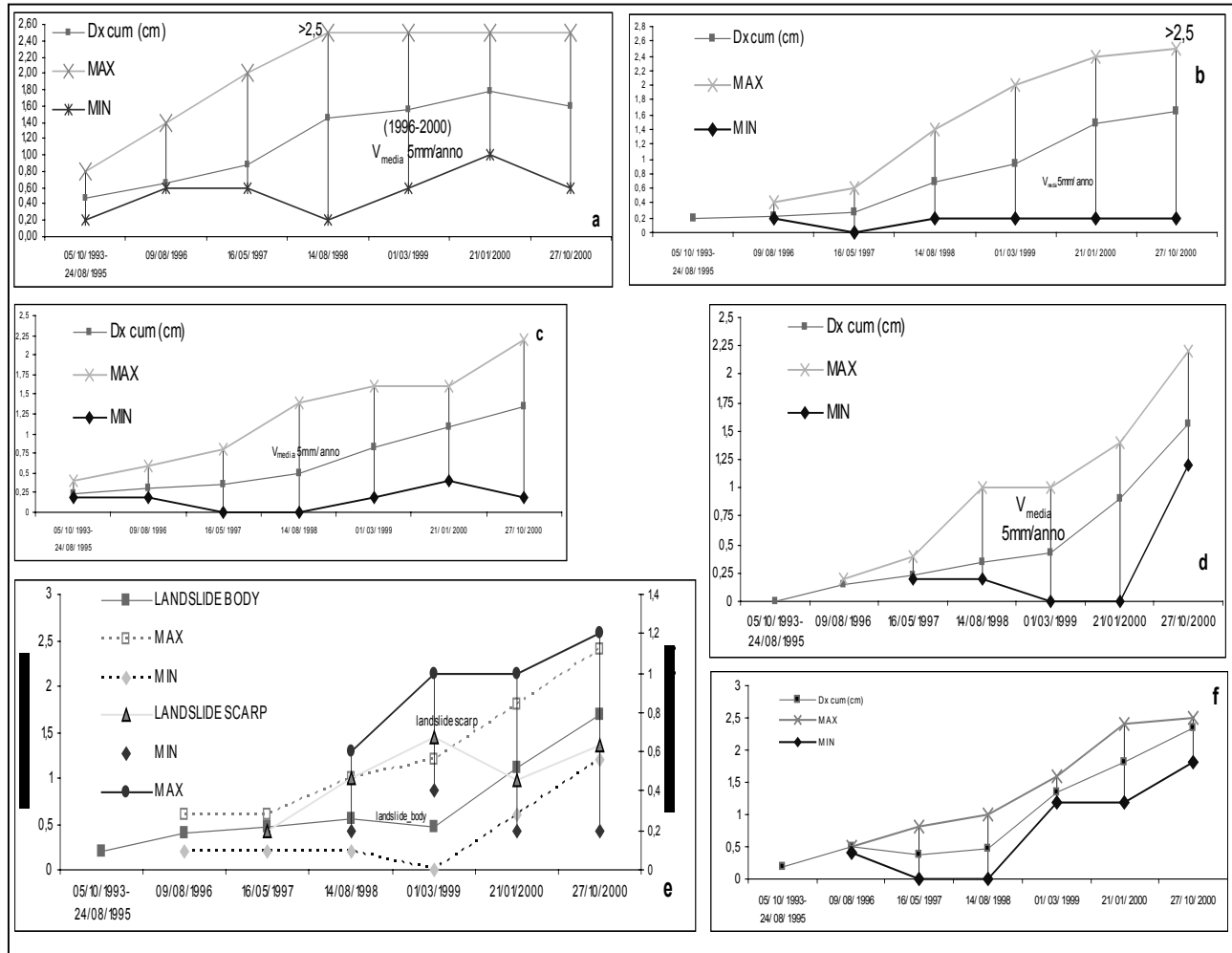


Figure 5-San Luca: output view-line data; deformation values are cumulated from the first survey (1993).

Conclusioni

Definito lo scenario morfoevolutivo dei siti in studio attraverso l'analisi di fonti dirette ed indirette, la complessità dei dati DIF-SAR ha evidenziato alcuni limiti connessi sia ai concetti base di acquisizione (presenza di vegetazione, acquisizione dati tramite le sole orbite discendenti, mancanza di superfici riflettenti, ecc.) come nel caso della frana di Padia-S.Cataldo, sia alla presenza di movimenti

estremamente veloci in cui il tasso di deformazione influenza negativamente la coerenza delle scene, come verificato nel caso della "frana di Serra di Buda" (velocità >13mm/anno).

Altrove, invece, in condizioni al contorno favorevoli, i risultati DIF-SAR ottenuti hanno consentito di condurre un'analisi storica dei dissesti, attraverso indicazioni, puntuali e complessive, circa la recente evoluzione spaziotemporale dei movimenti analizzati; tutto ciò ottemperando,

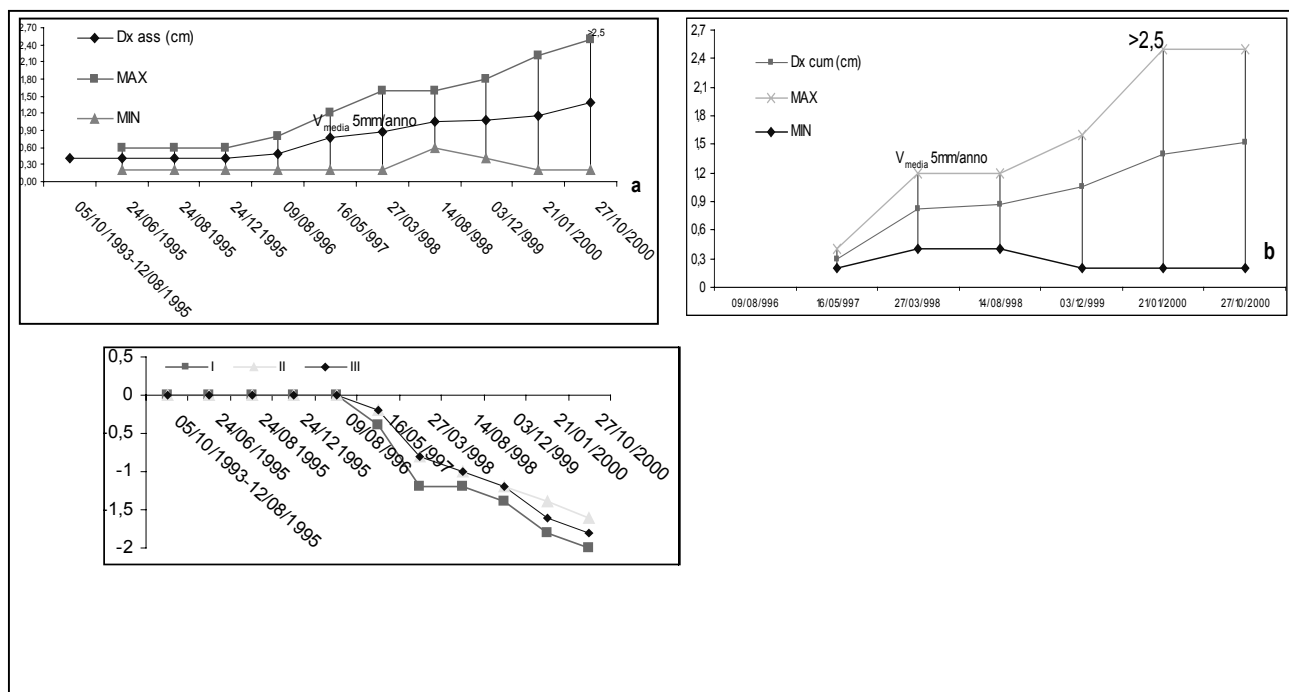
contestualmente, al monitoraggio degli stessi. In particolare, in caso di acquisizioni temporali ampie sono state ottenute informazioni principalmente sui movimenti lenti, come per le colate o scorrimento-colate di S. Luca; i movimenti più pronunciati, come nel complesso fenomeno del centro storico di S. Luca o nella fascia di detensionamento a monte di Serra di Buda, sono stati registrati grazie alle acquisizioni temporali ristrette. Sebbene si tratti in entrambi i casi di misure relative, dove sono rispettati i requisiti di base e geometrici per l'acquisizione delle scene, i dati di output lungo la linea di massima pendenza confermano il trend deformativo quantificato lungo la linea vista, anche se raggiungono valori relativamente maggiori.

Al tempo stesso, le elaborazioni interferometriche condotte, integrate sempre e comunque da un approccio multidisciplinare e da un monitoraggio geotecnico, possono fornire un valido contributo sia per validare le ipotesi circa la morfodinamica dei versanti sia per la costruzione di modelli geologico-evolutivi degli stessi.

Ringraziamenti

Si ringraziano l'Ing. Antonio Morabito ed il Dott. Luigi Maria Mollica per la preziosa collaborazione prestata durante le fasi di rilevamento geologico e geomorfologico e l'attività di raccolta dati e organizzazione del monitoraggio, ancora in corso.

Figura 6- Acri: dati di output lungo la linea vista; i valori di deformazione sono cumulati a partire dalla prima acquisizione; nel riquadro a



sinistra le deformazioni di alcuni pixel caratteristici sono rappresentate secondo l'abbassamento topografico.

Figure 6-Acri: output view-line data; deformation values are cumulated from the first survey. On the left box, deformation data of indicative pixels are planned according to topographic failure.

Bibliografia

Almagià R., 1910. "Studi geografici sulle frane in Italia: vol. II, Appennino Centrale e Meridionale". Memorie della Società Geografica Italiana, XIV. Società Geografica Italiana. Via del Plebiscito, 102 Roma.

Antronico L., 2001. - "Storiografia - Indagine storica sulle date di mobilitazione della frana in località Serra di Buda"- In: "Relazione sulla seconda fase - Convenzione Regione Calabria-CNR IRPI per il monitoraggio della frana di Serra di Buda (Acri)".

Amaro O., Caracciolo T., Gabriele G., La Pietra T., Mollica L.M. Pellegrino A., 2004. "Progetto sperimentale di monitoraggio avanzato in siti a rischio frana: fornitura e messa in esercizio di un

sistema di monitoraggio basato su studio mediante interferometria, sistemi GPS, sensori meteo e geotecnici, e realizzazione rete w-lan nei centri abitati di Acri (Cosenza) e San Luca (Reggio Calabria)". Riv. Ambiente Italia, (Protezione Civile) - Convegno Nazionale L'Europa incontra L'Italia PODIS: una risorsa per il Mezzogiorno; Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio.

Autorità di Bacino Regione Calabria, 2001. "Dossier Comuni San Luca e Acri"- Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), Regione Calabria".

Bonardi G., Giunta G., Perrone V., Russo M., Zuppetta A & Ciampo G., 1980. "Osservazioni

sul'evoluzione dell'arco calabro peloritano nel Miocene inferiore: la Formazione di Stilo-Capo d'Orlando". Boll. Soc. Geol. It. 99, 365-393.

Caracciolo T., La Pietra T. & Pellegrino A., 2006. "Trattamento dei data base ottenuti da Rilevamento Geomorfologico e da Interferometria DIF-SAR: il caso di Acri e S. Luca, Calabria (Italy)". APAT in stampa.

Catenacci V., 1992. "Il dissesto idrogeologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990 - S.G.N., Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia". Cronistorie Calabresi. Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato, 228-245.

La Pietra T., Mollica L. M. & Pellegrino A., 2004. "Progetto sperimentale di monitoraggio

avanzato in siti a rischio frana: fornitura e messa in esercizio di un sistema di monitoraggio basato su studio mediante interferometria, sistemi GPS, sensori meteo e geotecnici, e realizzazione rete w-lan nei centri abitati di Acri (Cosenza) e San Luca (Reggio Calabria) - Relazione Tecnica Finale". Archivio Autorità di Bacino Regione Calabria, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (PODIS).

La Pietra T., Mollica L. M., Morabito A. & Pellegrino A., 2005. "Progetto sperimentale di

monitoraggio avanzato in siti a rischio frana: fornitura e messa in esercizio di un sistema di monitoraggio basato su studio mediante interferometria, sistemi GPS, sensori meteo e geotecnici, e realizzazione rete w-lan nei centri abitati di Acri (Cosenza) e San Luca (Reggio Calabria) - Dati Archivio Autorità di Bacino Regione Calabria.

Montanari G., 1939. "Studio sui movimenti franosi in provincia di Reggio Calabria". *Annali LL.PP.*, 77, 165-185.

Tansi C. & Greco R., 2001. "Geologia, Geologia strutturale e Litologia"- In: "Relazione sulla seconda fase - Convenzione Regione Calabria-CNR IRPI per il monitoraggio della frana di Serra di Buda (Acri)".

Vai G.B., 1992. "Il segmento Calabro-Peleoritano dell'orogene ercinico. Disaggregazione palinspastica". *Boll. Soc. Geol. It.*, 111, 109-129.