

Sistemi integrati di monitoraggio mediante telerilevamento e strumentazioni in foro di aree a criticità geomorfologica. Esempi di applicazioni nell'Appennino dauno

Daniela Alemanno¹, Tiziana Caggiano¹, Antonio Castorani¹, Antonio Rosario Di Santo¹,
Daniela Di Carne¹, Antonello Fiore¹, Alberto Refice², Fabio Bovenga², Guido Pasquariello²,
Raffaele Nutricato³, Domenico Conte³

¹ Autorità di Bacino della Puglia, c/o Tecnopolis CSATA, 70100 Valenzano (Bari), Italy,
tel. +39 0804670567, e-mail: segreteria@adb.puglia.it

² ISSIA-CNR, Via Amendola 122/D, 70126 Bari, Italy,
tel. 080 5929432, e-mail: {refice, bovenga, pasquariello}@ba.issia.cnr.it

³ Dipartimento Interateneo di Fisica, Politecnico di Bari, Via Amendola 173, 70126 Bari, Italy,
tel/fax +39 080 5443144, e-mail: raffaele.nutricato@gapsrl.eu

Riassunto

L'articolo descrive alcuni dei risultati ottenuti nell'ambito di un'attività di studio dei fenomeni franosi che interessano il territorio dell'Appennino dauno. L'obiettivo è quello di individuare, mediante osservazioni ad ampia scala con tecniche di telerilevamento satellitare, aree con evidenze di spostamento in atto, da attrezzare con strumentazioni in foro per la definizione e modellizzazione delle deformazioni profonde e delle caratteristiche idrogeologiche ed idrologiche.

L'indagine a larga scala è stata realizzata impiegando l'Interferometria SAR ed in particolare la tecnica dei diffusori persistenti (PSI), che permette di monitorare movimenti millimetrici di oggetti coerenti nel tempo, prevalentemente coincidenti con manufatti antropici. Per mezzo dell'algoritmo SPINUA sono state elaborate serie di dati acquisiti con cadenza mensile dai sensori SAR a bordo dei satelliti europei ERS ed ENVISAT.

L'indagine ha coperto l'intervallo temporale 1995-2008 e ha permesso di individuare aree a ridosso dei paesi interessate da velocità medie anche di pochi mm/anno. Le singole aree sono state oggetto di indagini geognostiche indirette di tipo geofisico (tomografie elettriche, sismiche in foro e misurazione della radioattività naturale nei fori di sondaggio) e indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo). Nel lavoro si mostrano i primi risultati di questa attività integrata di monitoraggio avanzato che hanno riguardato in particolare il comune di Orsara di Puglia (FG).

Abstract

The paper describes some results recently obtained in the framework of a monitoring of landslide phenomena affecting the Daunia Apennines, in Southern Italy. The objective is to identify, thanks to large-scale remotely sensed data, areas with evidence of ongoing displacements, with the aim of ground truthing the affected areas with borehole instrumentation, to define and model hydro-geologic characteristics and deep-seated deformations.

The large scale investigations have been performed through use of SAR interferometry techniques, and in particular the persistent scatterers technique (PSI), which allows monitoring millimetric displacements of objects which stay coherent in time, mainly coincident with man-made features. Through the SPINUA algorithm, series of satellite data, acquired monthly by the SAR sensors on board the ERS and ENVISAT spacecraft have been processed.

The analysis covered the temporal interval between 1995 and 2008, and allowed to identify peri-urban areas affected by average displacement rates of a few mm/yr.

The areas have been investigated through indirect geophysical methods, such as electrical tomography, borehole seismic and radioactivity measurements, as well as direct, such as continuous coring and core-destructive sampling. The paper presents the results obtained through this advanced activity of integrated monitoring of ground instability which involved in particular the municipality of Orsara di Puglia (FG).

Introduzione

I recenti sviluppi nelle tecnologie di telerilevamento da satellite e la copertura frequente e regolare di vaste aree per mezzo di sistemi di Osservazione della Terra (OT) hanno portato ad un incremento nell'utilizzo delle immagini da satellite per la stima e il monitoraggio di rischi naturali (si veda CEOS Report, 2000 e riferimenti in esso). Grazie alle capacità dei sistemi radar di poter operare in qualsiasi condizione meteorologica, sia di giorno sia di notte, e di poter misurare con precisione piccole deformazioni al suolo (variazioni di quota di qualche millimetro), le tecniche di interferometria SAR (*synthetic aperture radar*, o radar ad apertura sintetica) risultano interessanti per il rilevamento e il monitoraggio di fenomeni di deformazione al suolo (subsidenza, faglie, frane, ecc.) su vaste aree. Il territorio dell'Appennino dauno è caratterizzato da un'elevata incidenza, in termini percentuali, di fenomeni franosi. L'Autorità di Bacino della Puglia ha proceduto, nell'ambito del progetto "Attivazione della rete di monitoraggio" finanziato dalla Regione Puglia, con fondi POR-Puglia 2000-2006, all'avvio di un programma integrato di monitoraggio di alcune aree campione, fra cui il comune di Orsara di Puglia. L'obiettivo delle attività è quello di individuare, mediante osservazioni ad ampia scala con tecniche di telerilevamento satellitare, aree con evidenze di spostamento in atto, da attrezzare con strumentazioni in foro per la definizione e modellizzazione delle deformazioni profonde e delle caratteristiche idrogeologiche ed idrologiche.

L'area di studio rientra nel tratto esterno di Appennino dauno che, insieme alla prospiciente Fossa bradanica, ricade nel più esteso sistema di *foreland thrust belt* riconosciuto dal Molise al confine calabro-lucano.

I dissesti idrogeologici riscontrati nell'Appennino dauno presentano meccanismi di formazione ed evoluzione differenti a seconda della litologia delle unità affioranti, del loro grado di deformazione/tettonizzazione e della posizione rispetto al fronte della catena. Va evidenziata la differenza esistente tra la parte più esterna della catena, corrispondente al fronte dell'alloctono, e quella più interna, interessata dalle profonde valli dei corsi d'acqua principali e dei loro affluenti.

In corrispondenza del fronte dell'alloctono, dove maggiore è l'energia del rilievo, l'intensa tettonizzazione dei corpi rocciosi, associata alle elevate pendenze, rappresenta la causa principale dell'instabilità dei versanti e i fenomeni franosi si sviluppano indipendentemente dall'evoluzione dei corsi d'acqua. Al contrario, nella zona più interna, è lo scalzamento al piede dei versanti la causa principale della franosità che si sviluppa sui fianchi vallivi dei corsi d'acqua che incidono l'Appennino.

Analisi dei dati telerilevati

L'elaborazione dei dati satellitari, effettuata tramite l'algoritmo SPINUA (Bovenga et al, 2004), ha fornito mappe degli spostamenti millimetrici di particolare oggetti la cui struttura si mantiene stabile nel tempo. Tali oggetti, denominati diffusori persistenti o *persistent scatterers* (PS), coincidono perlopiù con manufatti di natura antropica (costruzioni, strade, pali, dighe, ecc.), e ricadono quindi prevalentemente su aree urbane. L'intervallo temporale analizzato va dal 1995 al 2008, suddiviso in due serie distinte ottenute rispettivamente da dati del satellite ERS su orbite discendenti (1995-2000) ed ENVISAT su orbite ascendenti (2003-2008). Le acquisizioni ricoprono una vasta area al suolo (100 km × 100 km) rappresentata nel riquadro in Figura 1. Alcuni tra i paesi all'interno dell'area investigata che hanno mostrato segnali di instabilità sono stati selezionati per una successiva fase di analisi e monitoraggio. In questo lavoro ci soffermiamo sul comune di Orsara di Puglia. Le mappe di deformazione ottenute con la tecnica interferometrica sono rappresentate in Figura 1. È possibile osservare un progressivo *trend*, digradante a partire dal centro urbano verso

NE, di punti con velocità crescenti in valore assoluto, in direzione sub-verticale (il sensore radar misura la componente del movimento di qualsiasi bersaglio lungo la direzione di vista). Tale trend, che appare molto ben definito nei dati ERS, viene confermato, sebbene in apparenza con intensità minore, nei dati ENVISAT. Questi ultimi presentano comunque una minor densità di oggetti persistenti, dovuta probabilmente al minor numero di acquisizioni disponibili, che porta ad una maggior incertezza statistica nella ricerca dei PS.

Come si può osservare, i punti a maggior *rate* di movimento cadono sul versante che presenta fenomeni di dissesto, individuato in Figura 2 dall'area ombreggiata. I *rate* di deformazione massimi misurati vanno da 3 (su dati ENVISAT) a 11 mm/anno (dati ERS), come mostrato dalle serie temporali dei due punti rappresentativi rispettivamente nei pannelli a destra e sinistra di Fig. 1.

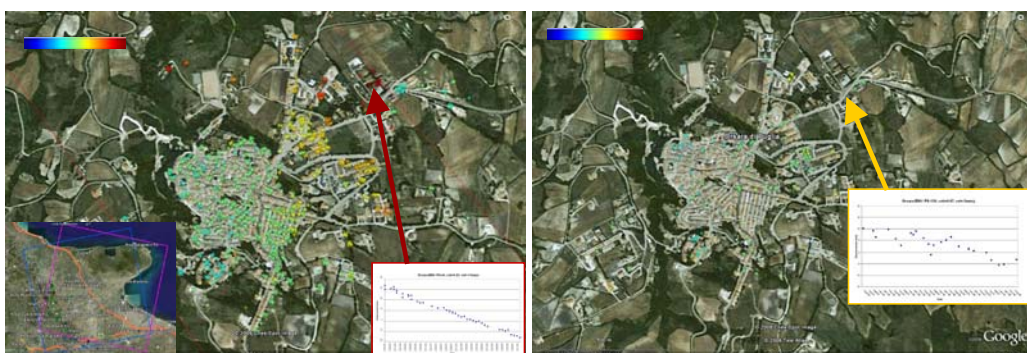


Figura 1. Mappe di spostamento dei bersagli stabili ottenute sull'area di Orsara di Puglia. Immagine di sfondo © Google, Inc. I grafici rappresentano serie temporali di spostamenti relativi, su due punti rappresentativi.



Figura 2 - Ortofoto dell'area in cui ricade l'abitato con rappresentazione delle indagini eseguite. Legenda: 1) Sondaggio meccanico a carotaggio continuo attrezzato a piezometro; 2) Sondaggio meccanico a distruzione di nucleo attrezzato a inclinometro; 3) Traccia di stendimento di tomografia elettrica; 4) Area a pericolosità geomorfologica molto elevata (PG3) individuata dal Piano di Bacino Stralcio di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) vigente.

Inquadramento geologico

L'unità stratigrafica più antica rilevabile nell'area di studio, di età oligo-cretacica, è costituita da argille e marne policrome del complesso indifferenziato, note in letteratura col termine di Argille Varicolori. Tale formazione è costituita prevalentemente da depositi argillosi, intensamente tettonizzati e con colori che variano dal grigio plumbeo al violaceo e al verde, cui si intercalano

strati o complessi di strati litoidi, spesso disarticolati, a prevalente componente argillitica o calcareo-arenacea. In generale si presenta con un assetto caotico. Nelle alternanze pelitiche, a causa degli intensi stress subiti, la formazione mostra una stratificazione indistinta o scagliettata, che, viceversa, diventa ben evidente e regolare in corrispondenza delle alternanze calcaree o calcareo-marnose.

In continuità di sedimentazione e talvolta con contatto tettonico, si rinvencono le rocce mioceniche riconducibili alla Formazione della Daunia, l'equivalente del Flysch di Faeto secondo la nomenclatura stratigrafica utilizzata nella redazione dei fogli disponibili del CARG a scala 1:50.000. Queste affiorano sia a NO che a SE del centro abitato. Il Flysch di Faeto, databile Miocene medio-superiore, si presenta come una tipica alternanza ritmica, indicativa di una sedimentazione flyscioide, di strati e banchi di calcareniti e calcari marnosi di colore bianco-avana con argille e marne grigio-verdastre che, nella parte basale della formazione, sono a composizione bentonitica. La stratificazione è sempre presente e molto netta; le giaciture degli strati, il cui spessore medio è in genere decimetrico, sono tuttavia abbastanza variabili a causa dell'intenso stato di tettonizzazione.

La successione stratigrafica prosegue verso l'alto con il complesso dei depositi marini pliocenici. Il termine basale del ciclo, in corrispondenza del centro abitato, è costituito da sedimenti conglomeratici poligenici con grado di cementazione variabile, cui si intercalano orizzonti e lenti sabbiose. Le intercalazioni sabbiose si fanno progressivamente sempre più frequenti fino a sfumare nella facies litologica sovrastante con cui si rinviene in parziale eteropia.

Inquadramento geomorfologico

Posto a circa 630 m s.l.m., l'abitato di Orsara di Puglia è situato in sinistra orografica del T. Cervaro sul fianco occidentale di una delle dorsali a decorso appenninico che raccordano il bordo occidentale del Piana della Capitanata ai primi contrafforti orientali dell'Appennino dauno.

Le pendici del rilievo che ospita l'abitato di Orsara di Puglia sono soggette a processi di deformazione gravitativa che si manifestano a Nord del centro storico in un'area periferica urbanizzata e attraversata da una delle strade di accesso al paese.

Si tratta di un grande fenomeno di scorrimento rotazionale che presenta una forma allungata con l'asse maggiore orientato in direzione SE-NO e lunghezza superiore al km. L'area di coronamento è situata a SE dell'abitato ad una quota compresa tra i 775 m e i 745 m s.l.m.; la nicchia, che presenta in pianta una forma arcuata, delimita la scarpata principale esposta, così come stimato attraverso l'osservazione delle foto aeree e sopralluoghi di campagna, per circa 430 m.

L'unghia del corpo di frana è ubicata alla base del pendio, intorno ai 575 m di quota sul l.m.m. dove il movimento confluisce nell'asta torrentizia che drena la valle ad Ovest del paese.

Esistono evidenze sui manufatti presenti nell'area di recente urbanizzazione sita a NE del paese che indicano come tale fenomeno non sia del tutto quiescente; chiari indizi di attività si riscontrano ad esempio lungo Via Gramsci dove si osservano importanti deformazioni della sede stradale e del muro di contenimento della scarpata posta a monte della strada i quali indicano che nelle porzioni più superficiali del corpo di frana hanno sede continui movimenti differenziali relativamente lenti.

Attivazione della rete di monitoraggio

Nell'ambito del POR Puglia 2000 – 2006 – PON – PODIS, “Attivazione della rete di monitoraggio delle aree in dissesto idrogeologico”, i tecnici dell'Autorità di Bacino della Puglia hanno redatto il progetto e diretto i lavori relativi alle “Indagini geognostiche e attivazione della rete di monitoraggio ai fini dell'aggiornamento del quadro conoscitivo con riferimento al bacino idrografico del fiume Cervaro nell'ambito del Comune di Orsara di Puglia (FG)”.

Finalità prioritaria della campagna di indagine e dell'avvio di attività di monitoraggio è quella di giungere, da un lato, ad una ridefinizione del reale perimetro dell'area in dissesto e, dall'altro, all'identificazione, all'interno del più vasto corpo di frana, di aree con differente grado di attività e di potenziale riattivazione.

Nell'area di indagine sono stati realizzati due sondaggi a carotaggio continuo (S1 e S2) profondi, rispettivamente, 40 e 25 metri, attrezzati per tutta la loro estensione con tubo inclinometrico in ABS, ed ulteriori due sondaggi a distruzione di nucleo per l'installazione, nel complesso, di quattro piezometri assoluti (Figura 2).

Sono stati inoltre eseguiti 18 stendimenti tomografici geoelettrici dipolari per la ricostruzione di 14 sezioni elettrostratigrafiche. I fori realizzati a carotaggio continuo, sono stati poi impiegati per l'esecuzione di prove sismiche in foro con metodologia *down-hole* e rilievi "gamma ray".

Le indagini sismiche in foro consentono l'individuazione delle superfici di discontinuità (rifrattori) tra porzioni di terreno o ammassi rocciosi a differente grado di densità e compattezza. Nel caso in esame, le sismostratigrafie ottenute hanno permesso di ricostruire gli spessori e le principali caratteristiche geomeccaniche (velocità delle onde elastiche, coefficiente di Poisson e moduli elastici dinamici) degli strati riconosciuti e di calcolare i valori di Rigidità Sismica dei singoli orizzonti, utili per la definizione dell'amplificazione sismica locale.

La correlazione delle risultanze delle prove sismiche in foro con quanto ottenuto dalle stratigrafie dei sondaggi meccanici a carotaggio continuo ha permesso la definizione del modello sismostratigrafico del sottosuolo per ciascuna postazione di sondaggio. In tal modo, si è potuto caratterizzare, dal punto di vista elastico-dinamico il sottosuolo indagato, ricavando un modello a più strati valido per l'intorno di ciascun foro investigato.

Le letture *gamma log* hanno consentito, attraverso la misura di precisione della radioattività naturale dei terreni, di ottenere la ricostruzione di estremo dettaglio delle verticali litostratigrafiche investigate. Si riporta nel seguito, a titolo esemplificativo, un grafico di raffronto dei dati ottenuti con le misurazioni, in discesa ed in risalita, della radioattività naturale dei terreni, con le velocità delle onde P ed S e con la relativa stratigrafia ricostruita mediante sondaggio. Particolarmente significativa è la presenza di un livello di circa 30 cm di paleosuolo (da -9.4 m a -9.7 m dal p.c.) ben evidenziato sia dalla sismica in foro, in termini di riduzione repentina delle velocità delle onde S, sia dai *gamma log* (Figura 3).

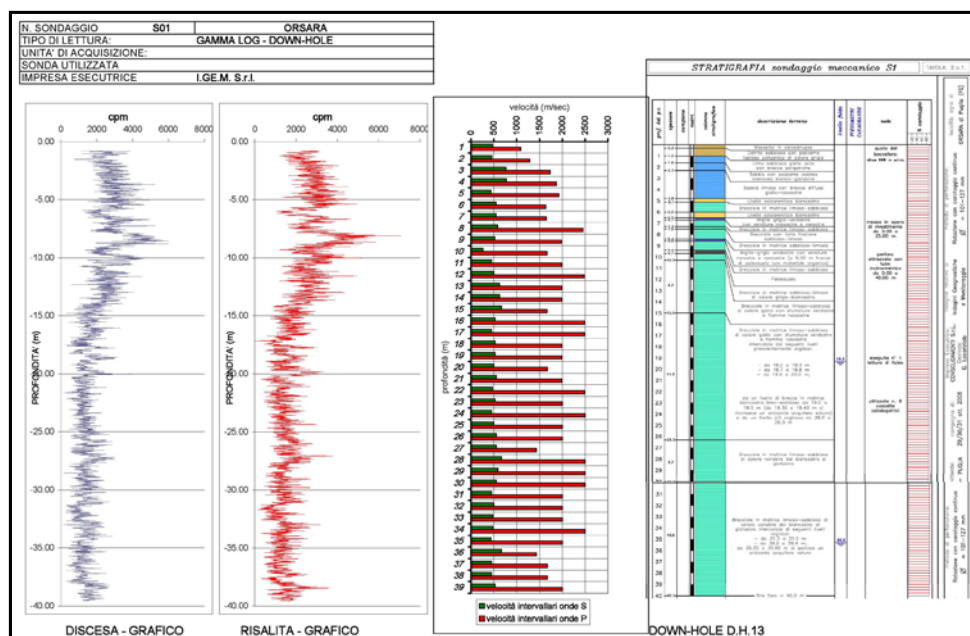


Figura 3– Comparazione tra diagrammi della radioattività naturale, velocità delle onde P ed S da down-hole e stratigrafia da carotaggio.

Le tomografie elettriche hanno restituito modelli elettrostratigrafici differenti per le diverse parti di frana investigate, sia a causa della complessità del corpo di frana, caratterizzato da notevole estensione ed eterogeneità di materiali e di spessore, sia a causa della variabilità litologica del substrato. Indicativa è la presenza, nelle sezioni riferite alla parte mediana del corpo di frana, di uno strato continuo a media resistività, con valori riconducibili a possibili materiali mobilitati da movimenti di massa con basso grado di saturazione, in sovrapposizione ad uno strato a bassa resistività indicativa di materiali saturi o a prevalente componente argillosa.

L'esecuzione dei sondaggi ha consentito l'individuazione di più livelli di falda (19 e 35 metri dal p.c. per S1 e 9.5 metri dal p.c. per S2), in corrispondenza dei quali sono stati allocati i piezometri elettrici assoluti, per l'acquisizione in continuo delle pressioni interstiziali, che saranno poi correlate ai dati forniti dalla stazione termo-pluviometrica presente in zona per la valutazione della risposta della falda alle precipitazioni.

Conclusioni e sviluppi futuri

Tra le attività avviate dall'Autorità di Bacino della Puglia per caratterizzare il grado di pericolosità geomorfologica delle aree interessate da dissesto idrogeologico presenti nella porzione dell'Appennino dauno di competenza, si inseriscono gli studi illustrati nel presente lavoro che prevedono in prima analisi l'individuazione di movimenti di superficie, osservati ad ampia scala con tecniche di telerilevamento, ed in seconda analisi l'attivazione di un monitoraggio geologico per l'individuazione di movimenti profondi. Una delle aree che ha evidenziato spostamenti superficiali in atto e che è stata oggetto dell'installazione di strumentazione per il monitoraggio geologico è quella della periferia orientale dell'abitato di Orsara di Puglia.

Le indagini geologiche condotte hanno messo in evidenza la presenza di un livello di circa 30 cm di paleosuolo (da -9.4 m a -9.7 m dal p.c.), indicativo di un vecchio movimento franoso, individuato durante l'esecuzione del sondaggio e ben evidenziato sia dalla sismica in foro, in termini di riduzione repentina delle velocità delle onde S, che dai *gamma log*.

L'attivazione della rete di monitoraggio geologico potrebbe essere estesa ad altre aree limitrofe, dove sono evidenti i punti a maggior *rate* di movimento individuati dall'indagine da satellite. Il monitoraggio permetterà così di definire il grado di attivazione del movimento franoso rispetto alle potenziali superfici di scorrimento profonde, verificando l'approccio multilivello applicato. La validazione dei risultati ottenuti consentirà di trasferire l'applicazione del modello ad altre situazioni potenzialmente instabili, opportunamente integrato con l'installazione di bersagli artificiali apposti, disposti secondo i movimenti attesi che si vogliono monitorare.

Bibliografia

- CEOS Report (2000). Earth Observation for Landslide Hazard Support, in Report of the CEOS Disaster Management Support Group, <http://disaster.ceos.org/landslide.htm>
- 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 F. Fortore ed il T. Calaggio (Monti della Daunia, Appennino Meridionale)*. Mem. Soc. Geol. It., 41: 411-422.
- D. Di Carne e T. Caggiano (2008) - *Indagini geognostiche e attivazione del monitoraggio ai fini dell'aggiornamento del quadro conoscitivo con riferimento al bacino idrografico del fiume Cervaro nell'ambito del Comune di Orsara di Puglia (FG). Fondi Por-Puglia 2000-2006*
- F. Bovenga et al. (2004), "SPINUA: a flexible processing chain for ERS / ENVISAT long term interferometry", *Proceedings of ESA-ENVISAT Symposium*, Salzburg, Austria, 6-10 September.
- A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca (2001), "Permanent Scatterers in SAR Interferometry". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39, 8-20.
- Zeza F., Merenda L., De Bellis P. & Carofiglio T. (1991) - *Condizioni di instabilità franosa nei centri abitati dell'Appennino Dauno*. Atti Conv. SCAI, Portonovo (AN), 10-12 Maggio 1989: 253-262.