

## **Applicazione di tecniche Avanzate DInSAR (A-DInSAR) per il monitoraggio della probabile instabilità degli edifici durante uno sciame sismico ante-evento (foreshock): il caso dell'Aquila**

Massimo Morigi (\*), Giampaolo Giuliani (\*\*),  
Giovanni Avanzi (\*\*\*) , Romolo Di Francesco (\*\*\*\*)

(\*) PhD Studente in Geoinformazione Università Tor Vergata Roma - morigi@innovazioneiperlaterra.org

(\*\*) Presidente della Fondazione Permanente Giuliani - info@fondazionegiuliani.it

(\*\*\*) Paneidos S.r.l. - giovanni.avanzi@paneidos.it

(\*\*\*\*) MySpaceWork S.n.c. - romolo.difrancesco@gmail.com

### **Riassunto**

L'Interferometria Differenziale SAR (DInSAR) si configura come una delle più recenti innovazioni tecniche non invasive per il monitoraggio di spostamenti in aree urbane. Attualmente diverse tecniche Avanzate DInSAR (A-DInSAR), basate sull'analisi di dati SAR multi-immagine o multi-interferogramma, permettono di ricavare informazioni per rilevare e misurare spostamenti di corpi continui. Tale attività di monitoraggio è perseguibile grazie all'uso di serie storiche dei dati satellitari SAR archiviati dall'Agenzia Spaziale Europea sin dal 1992 e con tempi di rivisitazione di circa 35 giorni. In questo modo è possibile ricostruire le informazioni sulla stabilità degli Scatteratori Permanenti (PS), anche quando nessuna attività in tal senso sia mai stata effettuata su aree specifiche. Le attività legate allo studio si pongono verso la ricerca della previsione e valutazione del rischio per l'area del bacino aquilano.

Nella traslazione del metodo all'analisi degli spostamenti pre-evento sismico occorre evidenziare che le vibrazioni cicliche indotte negli edifici in muratura possono essere causa di riduzione dell'efficienza operativa e dell'integrità architettonica e/o strutturale con particolare riferimento ai monumenti e agli edifici storici e strategici nei centri urbani.

Il presente studio sperimentale è il primo nel suo genere ed è parte integrante di un Dottorato di Ricerca in Geoinformazione - Univ. di Tor Vergata, del quadro ESA-EOPI, CAT-1 (ID10828) e del Progetto *Early Warning System* della Fondazione Permanente G. Giuliani.

### **Abstract**

Differential SAR Interferometry (DInSAR) is one of the newest innovations in non-invasive techniques for monitoring building movements in urban areas. Currently, various techniques of Advanced DInSAR (A-DInSAR), based on the analysis of multi-image or multi-interferogram SAR data, allow to obtain information to detect and measure displacements of continuous bodies. Such monitoring activities can be pursued through the use of time series of satellite SAR data archived by European Space Agency since 1992 and revisiting time of about 35 days. In this way, it is possible to reconstruct the information on the stability of the Permanent Scatterers (PS), even when no activity in this direction has ever been carried out on specific areas. The analysis in the study is focused on forecasting and risk assessment in the neighbourhood of L'Aquila.

As of the application of the method on the analysis of co-seismic displacements, we start from the consideration that the cyclical vibrations induced in the masonry buildings may lead to reduction of operational efficiency and of architectural and/or structural integrity, with particular reference to the monuments and historical and strategic buildings in urban centers.

This experimental study is the first of its kind and is an integral part of a PhD in Geoinformation - Univ. Tor Vergata, in the framework ESA-EOPI, CAT-1 (ID10828) and Early Warning System Project of the G. Giuliani Permanent Foundation.

## Introduzione

La tecnica InSAR convenzionale si basa sull'analisi delle variazioni del valore di fase tra due distinte acquisizioni, mentre la tecnica DInSAR si basa anch'essa sulla stessa analisi ma previa sottrazione dei contributi di fase legati alla topografia. Di maggiore interesse, per uno studio più approfondito del processo deformativo, rispetto al caso con due sole immagini, è l'impiego di tecniche avanzate che sfruttano un coerente numero di dati SAR. Sviluppate nell'ultimo decennio, le tecniche A-DInSAR (*Advanced DInSAR*), basate sull'analisi di tipo multi-immagine o multi-interferogramma, rappresentano l'evoluzione per il monitoraggio e la rilevazione di movimenti deformativi subverticali con cinematiche lente dei Scatteratori Permanenti (PS), originati da cause naturali o antropiche e con la precisione di pochi millimetri l'anno di velocità media.

I PS sono tipicamente corpi continui, dunque parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, in generale elementi già presenti sul suolo e su cui si suppone, di norma, insistano movimenti che seguono un andamento lineare; altri corpi "artificiali", detti Corner Reflector - passivi e attivi, i transponder. Ogni edificio, si ricorda, rappresenta un caso isolato se non unico la cui integrità strutturale ed architettonica dipende da una moltitudine di fattori (Di Francesco, 2008).

Le misure interferometriche sono sempre misure relative sia nel tempo, con la scelta della immagine master (zero temporale), sia nello spazio, con la necessità di identificare nell'area di interesse, un punto di riferimento rispetto al quale riferire tutte le stime di movimento dei PS.

La precisione delle misure di velocità relativa di spostamento dei PS diminuisce con l'aumentare della distanza dal punto di riferimento identificato. In presenza di spostamenti che non seguono il modello lineare si hanno forti perdite di coerenza che possono portare alla perdita del PS. Trovandoci quindi ad analizzare movimenti non lineari occorrerà modificare l'algoritmo utilizzato, per esempio attraverso l'applicazione di modelli polinomiali o una riduzione dei valori della soglia di coerenza. L'adozione di modelli diversi dal lineare comporta tuttavia un notevole calcolo computazionale che rende possibile la loro applicazione solo nel caso di studi a scala di dettaglio. Per studi che afferiscono al monitoraggio di processi deformativi cinematici lenti risulta cruciale l'impiego di algoritmi e tecniche che analizzano i movimenti non lineari (Rocca, 2013).

Tutte le cause (naturali e antropiche) sono state oggetto negli anni di studi per il monitoraggio delle deformazioni superficiali attraverso l'impiego di tecniche DInSAR e A-DInSAR, in particolare in Italia furono per la prima volta ufficializzate, come strumento d'indagine, dal Prof. F. Barberi, dopo il crollo di una palazzina sita in Via di Vigna Jacobini a Roma (Verbali Camera dei Deputati, 1999). Particolare attenzione andrebbe posta, ove possibile e con i dati forniti da idonei strumenti (GPS, livellazione geometrica, accelerometri, ecc), al calcolo degli errori associati alle misure (quantitative) per assegnare ad esse una significatività e sulla ricerca e interpretazione fisica del fenomeno (qualitativa).

Nella traslazione del metodo all'analisi degli spostamenti pre-evento sismico occorre evidenziare che le vibrazioni cicliche indotte negli edifici in muratura possono essere causa di riduzione dell'efficienza operativa e dell'integrità architettonica e/o strutturale con particolare riferimento ai monumenti e agli edifici storici e strategici nei centri urbani; in questo modo, soprattutto allorché la tecnica proposta è affiancata alle metodologie tradizionali, risulta possibile eseguire una costante verifica degli effetti di tali vibrazioni sull'edificio potendo evidenziare eventuali condizioni di criticità durante gli sciami sismici (foreshock). Tutto ciò nasce da un'analisi rigorosa delle problematiche attinenti la propagazione e gli effetti dei terremoti sulle strutture, quindi assume la connotazione di uno studio alquanto complesso difficilmente riproducibile con modelli fisico-matematici.

Il sisma del 6 aprile 2009, come si evince nella Figura 1 a, non costituisce la massima intensità osservata nel bacino dell'Aquila, poiché nel 1349, nel 1461 e nel 1703 si erano già verificati eventi con intensità uguali o maggiori; nel 1461 e nel 1703 tali eventi furono preceduti da periodi di sciame sismico come nel 2009. Il crescendo dei valori di magnitudo e la frequenza della sequenze del 2009 (periodo ottobre 2008 - marzo 2009) è rappresentata nella Figura 1 b.

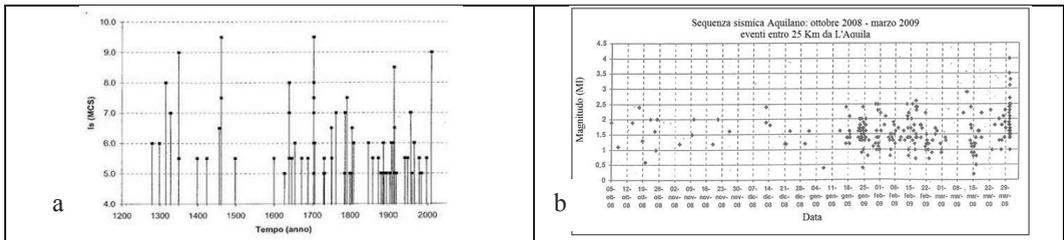


Figura 1 - Grafico Tempo - Intensità Macrosismica per L'Aquila (a) e valori di magnitudo nel periodo di sciame sismico 10/2008 - 03/2009 (b). Tribunale L'Aquila sentenza 380/2012.

Lo studio dei probabili effetti prodotti da uno sciame sismico ante-evento sui corpi continui, sino ad oggi, non risulta essere un settore di ricerca. Tali corpi, per quanto afferisce alle attività di previsione e valutazione del rischio sismico e identificati con le tecniche A-DInSAR, potrebbero essere considerati come "precursori geodetici".

Il lavoro presenta varie applicazioni di tecniche standard e avanzate per l'individuazione di Scatteratori Permanenti. Tali tecniche sono applicate attraverso l'impiego del software SARPROZ.

### Inquadramento geo-litologico della Città dell'Aquila

L'Aquila è ubicata nell'Appennino Laziale-Abruzzese ed è stata interessata da tettonica distensiva con direzione prevalente SW-NE a partire dal Pliocene medio (Pace et al., 2006). I depositi alluvionali hanno età comprese tra il Pleistocene Medio e l'Olocene e sono formati da alternanze di limi calcarei, ghiaie e conglomerati. Questi depositi hanno colmato il bacino e sono stati a loro volta ricoperti da depositi detritici di chiusura (conoidi e detriti di versante), variamente dislocati dalla tettonica recente (Bosi, Bertini, 1970). Tali caratteristiche geologico-geomorfologiche rendono l'area soggetta a fenomeni di amplificazione sismica locale (De Luca, 2005).

L'area è stata analizzata secondo due diversi approcci, di seguito descritti; la Figura 2 a ne riporta i limiti geografici.

### Metodologia

Per effettuare l'analisi dei PS sono state acquisite, presso l'ESA, immagini SAR - ERS e Envisat-ASAR, nello specifico: 169 lungo l'orbita discendente (track 079 e 308) e 101 lungo l'orbita ascendente (track 129 e 401); l'arco temporale considerato per la ricerca risulta essere da marzo 2003 al 5 aprile 2009 (prima dell'evento sismico maggiore).

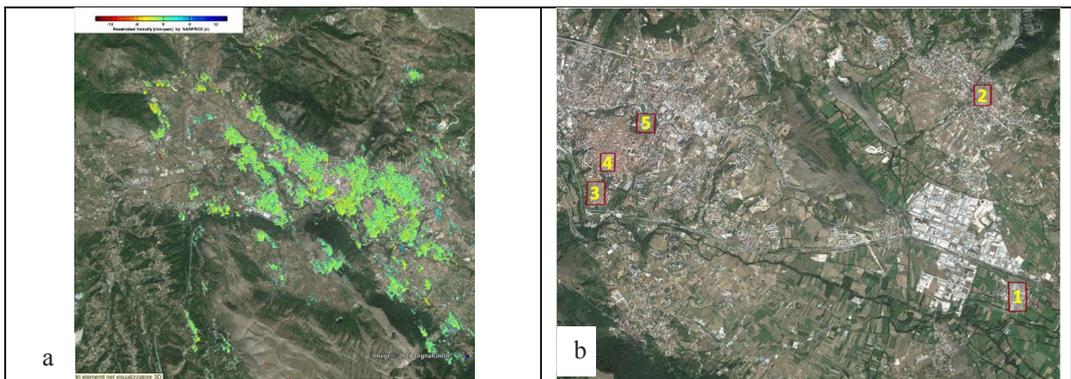


Figura 2 - Area analizzata con tecnica PS (a) - aree analizzate con tecnica Avanzata DInSAR (b).

Le immagini sono state elaborate attraverso il software SARPROZ, uno strumento appositamente sviluppato in ambiente Matlab per analisi InSAR multi-immagine come PS (Ferretti et al, 2001) e QuasiPS (QPS) (Perissin, Wang, 2012).

Sono stati impiegati due diversi approcci: **a)** analisi standard dei PS - in cui le velocità di spostamento sono valutate applicando un modello lineare di movimento (Ferretti et al, 2001); **b)** analisi di piccole aree (*tool Small area*) - in cui è possibile ottenere una maggiore precisione nella stima dei spostamenti e, soprattutto, per individuare e stimare gli scatteratori permanenti soggetti a movimenti non lineari.

La prima per analisi è stata utilizzata a scala comunale e la seconda a scala di dettaglio.

Il convincimento all'uso di tale algoritmo è suffragato dal fatto che i PS, supposto che in condizioni di calma sismica essi siano soggetti ai soli movimenti costanti lenti (quindi movimenti lineari) e che, in condizioni di sciame sismico - considerando anche il grado di amplificazione sismica dell'area, gli stessi potrebbero aver subito delle improvvise accelerazioni.

Per le operazioni che afferiscono all'impiego di DEM (modulo *Preliminary geocoding*) sono stati impiegati: SRTM 90 m e 30 m e il DTM passo 10 m.

Una particolare cura è stata perseguita per determinare la corretta posizione 3D del segnale radar. In merito a tutto ciò è in corso di sviluppo un software per la simulazione che permetta di trasformare oggetti modellizzati (ad es. provenienti da file di tipo KM), a immagini radar (Morigi et al., 2012)

### Applicazione tecnica PS standard a scala comunale

L'analisi standard PS è stata utilizzata per lo studio dell'area a livello comunale (Fig. 2 a), al fine di avere una visione generale d'insieme dei movimenti all'interno dell'area. A tale scopo tutti i risultati sono stati integrati in ambiente GIS con un database, contenente il censimento di vulnerabilità degli edifici pubblici, strategici e speciali (Martinelli, Corazza, 1999).

L'analisi che si presenta è relativa al solo stack 401 (Envisat), con orbita ascendente e composto da 40 immagini; ha portato all'identificazione di 3.310 PS su un'area di 310 km<sup>2</sup> (~10 PS/Km<sup>2</sup>) e spostamenti lungo LOS (*Line Of Sight*) che variano da +49 a -40 mm/anno. Tale modalità di analisi non si sposa perfettamente con l'obiettivo della ricerca. A titolo esemplificativo la Figura 3 mostra la distribuzione dei valori di coerenza dei PS prima (a) e dopo l'applicazione del modulo *Atmospheric Phase Screen* (APS) - per la rimozione del contributo atmosferico (b).

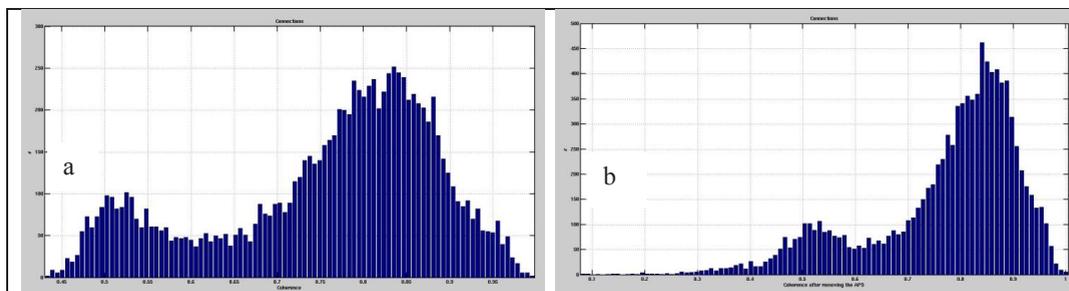


Figura 3 - Comparazione della distribuzione dei valori di coerenza - prima (a) e dopo (b) la applicazione del modulo APS).

### Applicazione tecnica Avanzata DInSAR

La tecnica Avanzata DInSAR è stata applicata attraverso il *tool Small area* e la zona considerata è delimitata nella Fig. 1 b, area n° 3.

Nel modulo preposto (*Amplitude Time Series Analysis*), per questa applicazione, è stato impiegato l'algoritmo che permette di rilevare i movimenti che hanno un andamento non lineare.

L'analisi dei Scatteratori Permanenti, relativi al solo stack 401 - Envisat-ASAR, con orbita ascendente e composto da 40 immagini, ha portato all'identificazione di 55 PS su un'area di 0,108 km<sup>2</sup>, di cui 36 PS con un valore di coerenza  $\geq 0.80$  e spostamenti cumulativi lungo LOS (*Line Of Sight*) che variano da +6 a -10 mm/anno.

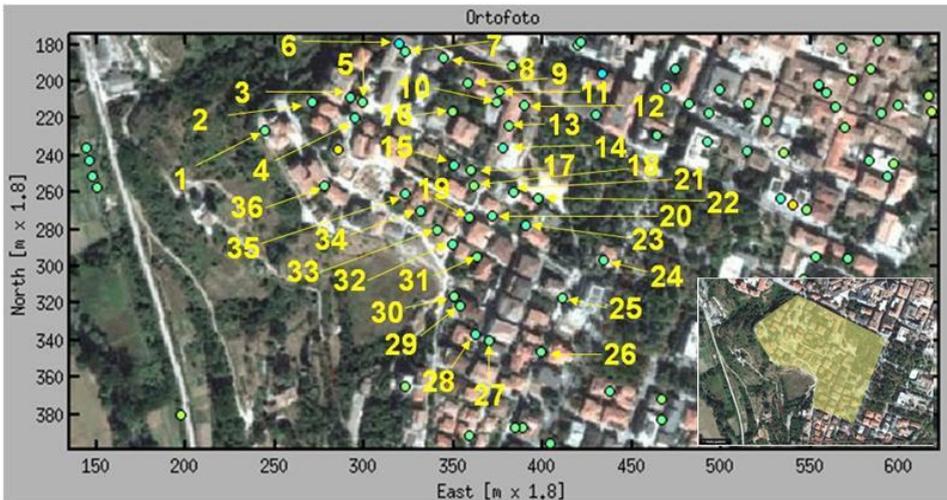


Figura 4 - Identificazione e numerazione dei PS selezionati con valore di coerenza  $\geq 0.80$ .

Nella Figura 4 i PS ricadenti nell'area di studio sono stati numerati e, per alcuni di loro (9 casi), la rappresentazione grafica degli spostamenti cumulativi si può osservare nella Figura 6.

Nella quasi totalità dei grafici è possibile apprezzare discrete deformazioni che presentano un andamento quasi simile, non è tuttora accertato, ma non è escluso a priori, che tali informazioni possano essere interpretate come precursori geodetici per il monitoraggio delle variazioni di stabilità degli edifici.

Altre anomalie si possono osservare nella Figura 5, sono particolari dei grafici di andamento degli spostamenti cumulativi, non presentati nella Figura 6 e riferiti ai PS n° 4 e 5.

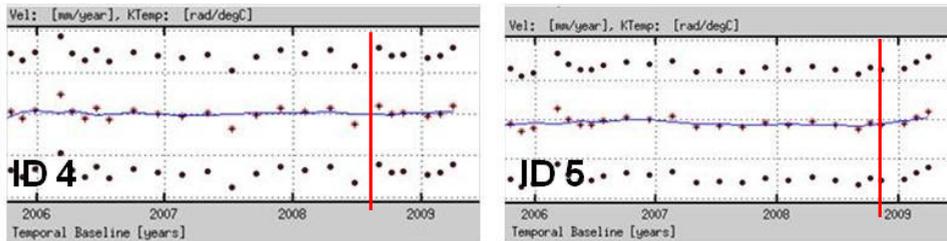


Figura 5 - Particolari dei grafici di andamento dei PS identificati come ID n° 4 e 5.

La particolare natura dei PS ID 4 e 5 è che, considerata la loro posizione relativa, lasciano osservare che siano riferiti spazialmente alla medesima struttura. Tale evidenza potrebbe essere confortata dall'andamento pressoché uguale dei valori relativi dello spostamento cumulativo e che, tali valori, sono riferiti al periodo temporale in cui avveniva il crescendo dei valori di magnitudo nel periodo di sciame sismico nel bacino aquilano, ossia da gennaio a marzo 2009.

Per valutare a livello qualitativo i valori desunti dall'analisi quantitativa, quale quella dei PS, sono state eseguite e sono in corso, altre tipologie di indagini **a)** relative a: verifica delle condizioni meteorologiche nelle date antecedenti al periodo di presa; **b)** analisi dei dati registrati dagli accelerometri (Rete Accelerometrica Nazionale - Progetto Itaca - *Italian Accelerometric Archive - PDG*); **c)** analisi dei dati GPS della Rete Geodetica della Regione Abruzzo; **d)** analisi dei dati della sismicità (Progetto ISIDE - *Italian Seismological Instrumental a Parametric Data-Base*); **e)** consultazione inventario fenomeni franosi (Progetto IFFI); **f)** consultazione di cartografie geologiche e geomorfologiche di dettaglio storiche.

Si può escludere, con un buon grado di approssimazione, che nel periodo di sciame sismico ante-evento, i movimenti dei PS possano essere stati indotti da fenomeni piovosi (sollevamenti) o di deficit idrico (abbassamenti), nonché da ritardi o accelerazioni lungo il cammino ottico delle onde elettromagnetiche dovuti alla presenza di neve. I dati accelerometrici relativi al periodo di sciame sismico, presenti nel database del Progetto Itaca, sono sprovvisti di dato PGD (componente verticale di spostamento) quindi andranno elaborati con idoneo software. I dati GPS in formato rinx, forniti dalla Regione Abruzzo e appartenenti alla Rete Geodetica, sono in fase di elaborazione.

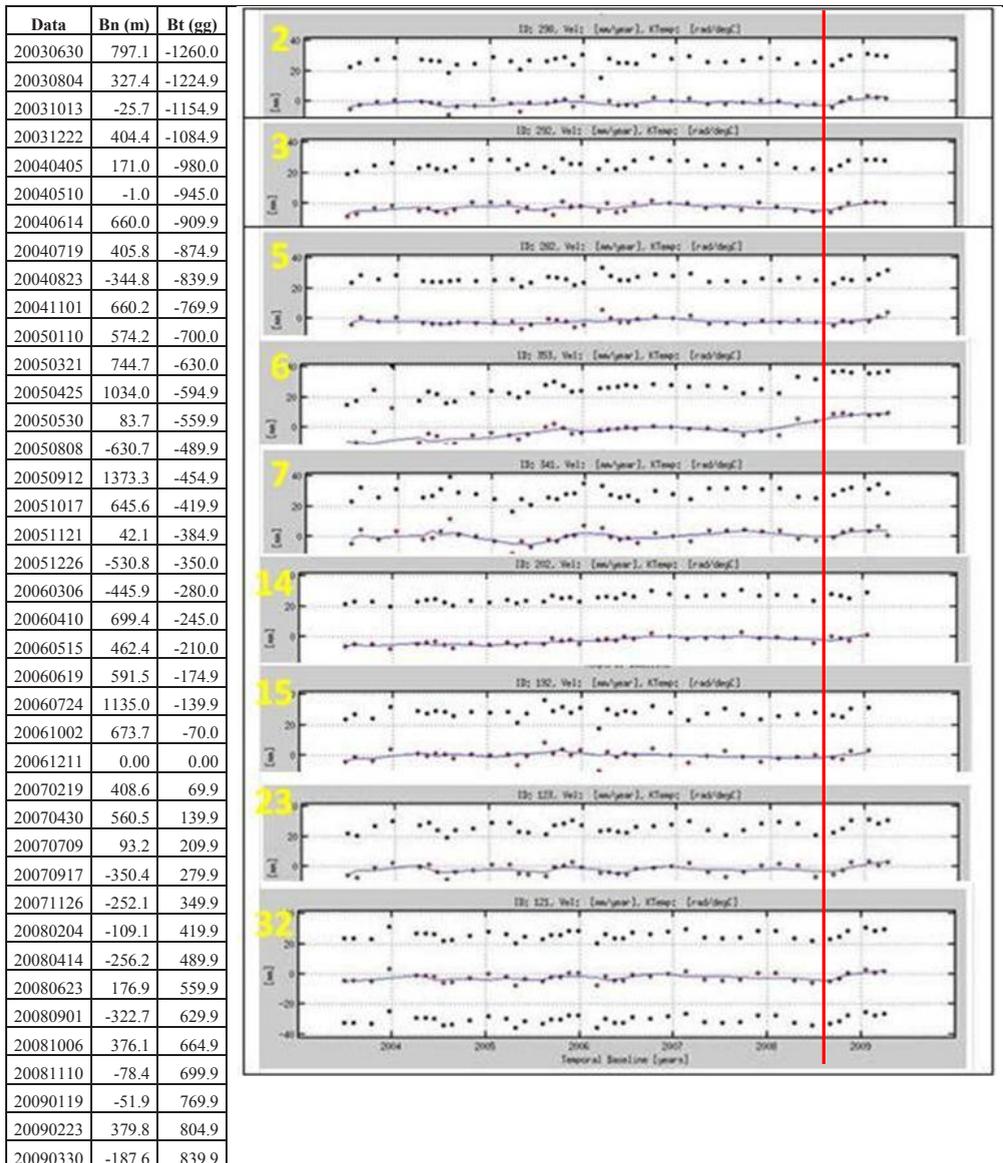


Figura 6 - Nella parte sinistra sono inseriti i dati di presa, Baseline normale e Baseline temporale, nella parte destra sono mostrati gli andamenti di alcuni PS; la retta verticale rossa rappresenta il periodo d'inizio dello sciame sismico.

## Conclusioni

Il presente lavoro ha focalizzato l'attenzione su un tema molto attuale in Italia, anche se sottostimato, come quello del monitoraggio della probabile instabilità degli edifici durante uno sciame sismico ante-evento (*foreshock*).

Tema che, obbligatoriamente, rientra nel più ampio e naturale panorama del monitoraggio e valutazione sismica della vulnerabilità del nostro patrimonio edilizio - progettato in assenza di normativa sismica o con norme obsolete. Tutto ciò si pone dunque nella direzione della previsione e valutazione del rischio, privilegiando la ricerca di strumenti, materiali e metodi che permettano di scoprire e percepire le anomalie che potrebbero amplificare il valore della vulnerabilità degli edifici durante uno sciame sismico e quindi dell'indice di rischio. Ricerca che non si deve fermare alla misurazione dell'effetto (dato quantitativo) ma deve investigare e studiare per determinarne la causa (dato qualitativo).

L'applicazione della tecnica Avanzata DInSAR proposta, ha evidenziato una ottima capacità analitica nell'identificazione e monitoraggio delle deformazioni dei corpi continui soggetti a movimenti non lineari per analisi a scala di dettaglio. I risultati sperimentali forniscono interessanti spunti di approfondimento ed evidenziano una serie di anomalie che potrebbero essere connesse, visto il periodo della comparsa e la verifica di alcuni fattori di disturbo, alle sollecitazioni indotte dallo sciame sismico ante-evento.

Questa ricerca, sollecitata dai vertici tecnico scientifici del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale attraverso organi di stampa, può contribuire efficacemente a cambiare l'approccio sinora seguito; l'integrazione con altri sistemi di rilevazione e misurazione è propedeutico, mentre le recenti e nuove piattaforme satellitari SAR permetteranno, visto i tempi di rivisitazione, di dotarsi di una mole consistente e continua di dati e quindi di informazioni.

Le attività legate a questa area di ricerca, ossia applicazione della tecnica A-DInSAR, impiego di standard e nuovi Corner Reflector passivi (Banda C e X), GPS e strumentazioni per il monitoraggio in continuo del quadro fessurativo, nonché l'acquisizione e generazione della conoscenza degli elementi descrittivi per la definizione dell'interazione terreno-struttura in campo sismico, sono già oggetto di sub-progetti specifici in campo nazionale e internazionale, e sono parte integrante del Progetto *Early Warning System* della Fondazione Permanente G. Giuliani.

## Bibliografia

De Luca G. et al., (2005), "*Evidence of Low-Frequency Amplification in the City of L'Aquila, Central Italy, through a Multidisciplinary Approach Including Strong- and Weak-Motion Data, Ambient Noise and Numerical Modeling*", in *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 95: 1469-1481

Di Francesco R. (2008), *Lesioni degli edifici*, Ulrico Hoepli Editore, Milano

Ferretti A. et al., (2001), "*Permanent scatterers in SAR Interferometry*", *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 8-20

Martinelli A, Corazza L. (1999), *Censimento di vulnerabilità degli edifici pubblici, strategici e speciali nelle regioni Abruzzo, Basilicata, Calabria, Campania, Molise, Puglia e Sicilia*, Dipartimento della Protezione Civile, Roma

Morigi M. et al., (2012), "*SAR interferometric monitoring of movements produced in ordinary masonry buildings during a seismic swarm*", *IEEE First AESS European Conference*, 1-4

Pace B. et al., (2006), "*Layered seismogenic source model and probabilistic seismic-hazard analyses in central Italy*", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96: 107-132

Perissin D, Wang T. (2012), "*Repeat-Pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets*", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50: 271-280

Rocca A. et al., (2013), "*Monitoring ground instability in wide areas and single-building cases by means of satellite A-DInSAR*", *HKIE Geotechnical Division Annual Seminar At Hong Kong*

Sentenza 380/2012, depositata il 18 gennaio 2013, Tribunale dell'Aquila

Verbali Camera dei Deputati. Seduta n° 622 del 17 novembre 1999