

# Elaborazione di dati radar satellitari per la Carta del Rischio del Patrimonio Culturale della Lombardia

Sergio URBISCI (\*), Jacopo ALLIEVI(\*\*), Stefano CESPÀ(\*\*), C. GERVASI(\*\*)

(\*) Direzione Generale Culture, Identità e Autonomie della Lombardia, Regione Lombardia, Via Pola 12/14, 20124 Milano, tel.02/6765.2655, fax 02/6765.2698, E-mail: [Sergio\\_Urbisci@regione.lombardia.it](mailto:Sergio_Urbisci@regione.lombardia.it)

(\*\*) Tele Rilevamento Europa - T.R.E. s.r.l., Via V. Colonna – 20149 Milano tel +39 02 4343121 fax +39 02 43431230

## Riassunto

La "Carta del Rischio del Patrimonio Culturale" della Lombardia è un sistema informativo territoriale di supporto alle decisioni relative al patrimonio storico-architettonico lombardo, sia in materia di monitoraggio del rischio cui sono sottoposti i beni immobili sia in materia di definizione delle politiche atte a programmarne la conservazione. Nell'intervento viene presentata una sperimentazione condotta insieme a Tele-Rilevamento Europa - T.R.E. s.r.l. per valutare l'utilità della tecnica dei "Diffusori permanenti", messa a punto da questa società, nel monitoraggio delle condizioni di stabilità statico-strutturale degli edifici di interesse storico-architettonico.

## Abstract

The "Risk Map of Cultural Heritage" of Lombardy region is a geographic information system supporting decisions in matter of risk monitoring and planned preservation of cultural heritage. The report especially describes the experimental use of the *Permanent Scatterers Technique*, set by Tele-Rilevamento Europa - T.R.E. s.r.l., to evaluate the state of static-structural stability of historical-architectonical buildings.

## Introduzione

La "Carta del Rischio del Patrimonio Culturale" della Lombardia, sviluppata a partire dall'analogo progetto dell'Istituto Centrale per il Restauro, è un sistema informativo territoriale di supporto alle decisioni relative al patrimonio storico-architettonico lombardo sia in materia di monitoraggio del rischio cui sono sottoposti i beni immobili sia in materia di definizione delle politiche atte a programmarne la salvaguardia e la conservazione. Nel sistema vengono analizzate ed elaborate informazioni sulla vulnerabilità dei monumenti, raccolte attraverso approfondite indagini svolte sul campo per rilevare lo stato di conservazione di ogni edificio, ed informazioni che descrivono il pericolo potenziale che fenomeni ambientali calamitosi costituiscono per il patrimonio culturale. Queste ultime informazioni, generalmente riportate su carte tematiche, vengono elaborate all'interno del sistema con tecnologie GIS per poter calcolare indicatori di pericolosità individuale, relativi cioè a ogni singolo edificio. Attualmente la Carta del Rischio è applicata a circa 15.000 edifici per i quali tali indicatori vengono calcolati e rappresentati; inoltre per circa 1.500 di questi è vengono calcolati e rappresentati anche gli indicatori di rischio individuale che risultano dalla combinazione delle informazioni riferite alla loro vulnerabilità con quelle riferite alla pericolosità del contesto territoriale in cui sono situati.

Nell'ambito delle attività connesse alla Carta del Rischio è stata realizzata una sperimentazione per verificare l'applicabilità, per gli edifici storico-architettonici, di una tecnica di elaborazione di dati radar satellitari (la Tecnica PS) finalizzata a:

- validare le informazioni sulla vulnerabilità dei monumenti già rilevate attraverso i sopralluoghi;
- monitorare l'evoluzione di eventuali fenomeni di instabilità strutturale degli edifici;
- individuare situazioni di pericolosità derivanti da instabilità strutturale non rilevate perché non presenti al momento del sopralluogo o perché non immediatamente rilevabili all'indagine visiva.

### **La Tecnica PS (*Permanent Scatterers Technique*)**

La tecnica dei Diffusori Permanenti (o Tecnica PS) è stata sviluppata e brevettata presso il Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva a Tele-Rilevamento Europa - T.R.E. s.r.l. (prima *spin-off company* del Politecnico di Milano) nel 2000. Si tratta di uno strumento basato sull'impiego di serie storiche d'immagini radar satellitari (in particolare dati SAR - *Synthetic Aperture Radar* - dei satelliti ERS 1/2 dell'Agenzia Spaziale Europea - ESA), estremamente efficace per il monitoraggio, con accuratezza millimetrica, di fenomeni di deformazione superficiale.

L'approccio PS si basa sull'osservazione di un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito appunto dai Diffusori Permanenti o PS. Essi corrispondono tipicamente a parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, comunque ad elementi già presenti al suolo, per i quali le caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione. Ciò non accade, ad esempio, alla vegetazione, il cui aspetto muta di continuo.

Utilizzando le serie storiche delle acquisizioni radar satellitari si ricava, per ogni singolo PS, il *trend* medio di deformazione con accuratezza compresa tra 0.1 e 1 mm/anno e l'intera serie storica di deformazione (in questo caso l'accuratezza arriva a 1 mm su ogni singola misura, per i PS migliori, ed è tale da far apprezzare fenomeni di dilatazione termica stagionale di singole strutture).

Tutte le misure sono rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS, *Line of Sight*) e sono di tipo differenziale, ottenute cioè dopo avere determinato un punto di riferimento a terra di coordinate note e supposto fermo (indicato come tali ad esempio da misure GPS o di livellazione ottica).

Per visualizzare i risultati è possibile rappresentare il trend medio di deformazione su un qualsiasi supporto che aiuti un'interpretazione e una geo-localizzazione dei fenomeni in atto (l'ottimo è operare in ambiente GIS, dove l'utente può selezionare il *layer* più opportuno).

Oltre ad accuratezza e densità spaziale dei punti di misura, un importante vantaggio della tecnica risiede nella ricchezza di dati provenienti dall'archivio ESA-ERS. E' infatti possibile avviare un'analisi PS oggi, avendo a disposizione dati a partire dal 1992: questo permette di ricostruire la storia passata dell'area di interesse.

I limiti consistono invece nella facoltà di apprezzare solo le deformazioni lungo la direzione di LOS, cioè approssimativamente lungo la verticale, e nel fatto che per portare a termine un'analisi PS è necessario che l'area considerata presenti una densità sufficiente di PS. Da ultimo, l'analisi di fenomeni di deformazione ad evoluzione particolarmente rapida (maggiore di 80 mm/anno) è possibile solo disponendo di informazioni a priori sui fenomeni in atto (in particolare sulla loro correlazione spaziale).

In definitiva i PS costituiscono una sorta di "rete geodetica naturale" per l'analisi di fenomeni di deformazione superficiale, uno strumento di monitoraggio senza eguali per precisione, densità spaziale di punti di misura e competitività economica, in particolare nello studio di fenomeni di subsidenza urbana e di deformazione lungo faglie sismiche, in aree estese centinaia o migliaia di chilometri quadrati.

Anche per quanto riguarda i fenomeni di instabilità di versante l'approccio PS presenta aspetti attraenti. Purché siano disponibili singoli bersagli radar (ad esempio casolari o, in ambiente montano, baite e/o affioramenti rocciosi), è possibile ricavare dati di deformazione in aree vegetate ad elevata decorrelazione temporale, dove un approccio interferometrico convenzionale fallirebbe.

### **La sperimentazione**

Il primo obiettivo dell'analisi è quello di individuare i bersagli radar, detti appunto PS, in grado di mantenere la propria "firma elettromagnetica" costante nel tempo, ovvero indipendente dal momento dell'acquisizione, e caratterizzati da un comportamento pressoché puntiforme, così da

garantire una scarsa sensibilità alle variazioni del punto di vista del sensore durante le acquisizioni. A tale scopo lo studio si focalizza sull'analisi statistica delle caratteristiche di pixel omologhi nelle diverse immagini, evidenziando i parametri più opportuni da utilizzare come soglie per discriminare gli effettivi PS dagli altri pixel. Una volta individuati i PS diventa possibile determinare le deformazioni in corso.

L'analisi effettuata sul patrimonio culturale storico-architettonico lombardo ha coinvolto tre diverse aree: il centro cittadino di Milano, la città di Monza (MI) e il territorio della Valcamonica (BS).

La prima fase della catena di elaborazione ha riguardato l'identificazione dei monumenti monitorabili, ovvero di quei manufatti che, sulla loro superficie, presentano uno o più bersagli radar. Ne è risultata una selezione di 580 monumenti, tutti corredati da adeguate informazioni geografiche per una corretta visualizzazione con software di tipo GIS. Di questi sono stati scelti, per l'effettiva analisi, 32 edifici localizzati nel centro cittadino di Milano, 17 collocati all'interno del territorio della città di Monza e 18 localizzati nei vari centri urbani della Valcamonica.

### **Il dettaglio dei risultati**

L'analisi, iniziata alla fine del 2003, è stato il primo esperimento di applicazione della tecnica PS su larga scala al monitoraggio di edifici di interesse storico-architettonico.

I principali obiettivi fissati per il progetto sono stati:

- studio delle potenzialità dell'approccio PS come strumento per identificare e descrivere fenomeni di deformazione ad evoluzione lenta (mm/anno – cm/anno) che interessino anche singole parti del fabbricato sotto osservazione;
- integrazione, a posteriori e in ambiente GIS, dei risultati PS con i dati già disponibili;
- creazione di una "Scheda del Monumento", che funzioni come strumento di rapida consultazione, contenente la descrizione dell'eventuale deformazione presente e un inquadramento dei movimenti cui è soggetta l'area in cui è localizzato il bene monitorato.

Come già anticipato l'analisi PS è stata condotta su tre zone differenti: la città di Milano, la città di Monza e la Valcamonica per le quali erano già state raccolte, attraverso campagne di catalogazione o georeferenziazione della Carta del Rischio, le informazioni necessarie all'individuazione dei monumenti presenti e candidati al monitoraggio.

Sulle prime due aree (Milano e Monza) sono risultati disponibili, negli archivi ESA-ERS, ben tre *dataset* distinti, due discendenti ed uno ascendente.

Il primo *dataset* discendente (*Track* 480, *Frame* 2691) è formato da 83 immagini e copre l'arco temporale aprile 1992 - gennaio 2003.

Il secondo *dataset* discendente (*Track* 208, *Frame* 2691) è composto da 80 immagini, la prima delle quali acquisita nel maggio 1992 e l'ultima nel dicembre 2002.

Il *dataset* ascendente, invece, corrisponde a 31 scene (*Track* 487, *Frame* 909), acquisite tra luglio 1992 e settembre 2002.

Sulla Valcamonica, invece, sono stati utilizzati due *dataset* (uno ascendente e uno discendente): quello ascendente (*Track* 215, *Frame* 909) è formato da 34 immagini che coprono l'arco temporale aprile 1993 - settembre 2002, mentre il discendente (*Track* 208, *Frame* 2691) è costituito da 88 immagini acquisite tra maggio 1992 e dicembre 2002.

L'elaborazione dei dati satellitari è stata condotta con un approccio di tipo "Advanced", in modo da estrarre la maggior informazione possibile dai dati in possesso di TRE.

Nelle città di Milano e Monza, in un'area complessiva di 78 Km<sup>2</sup>, sono stati individuati 80.000 PS circa, con una densità media di 1.025 PS/Km<sup>2</sup>. Questo valore somma le densità delle elaborazioni

ascendente e discendente (molti dei PS individuati in una elaborazione risultano essere bersagli radar anche nelle altre).

In Valcamonica, in un'area di 200 Km<sup>2</sup> , sono stati identificati 25.000 PS circa (ascendente + discendente).

E' evidente come la densità dei PS in zona urbana sia risultata nettamente maggiore di quella in Valcamonica a causa delle caratteristiche prevalentemente montuose di quest'ultima .

Si è poi provveduto a creare uno strumento di archiviazione dei dati PS sui monumenti di interesse allo scopo di poter avere a disposizione un documento di rapida consultazione che contenesse sia un inquadramento generale dell'area d'intorno sia una sintesi particolareggiata dei dati disponibili sul monumento: è stata perciò redatta una scheda per ogni monumento monitorato (un esempio di tale scheda è riportato in calce all'articolo), mettendo in evidenza i *dataset* utilizzati per l'analisi e completando la descrizione con più serie storiche di deformazione grazie alle quali ricavare gli eventuali movimenti con andamenti non lineari o lineari a tratti.

L'organizzazione delle "Schede dei Monumenti" segue una linea comune: la prima pagina mostra in sequenza immagini del monumento in una visione d'insieme, per inquadrare il moto dell'area in esame, e del monumento in una visione di maggior dettaglio per segnalare, tramite etichette riportanti il codice dei PS, i punti di misura di maggior interesse.

Il confronto tra la prima e la seconda immagine serve a mettere in luce eventuali moti differenziali del manufatto rispetto al contesto d'intorno. Dalla seconda immagine si ricavano invece informazioni su eventuali moti differenziali all'interno della struttura analizzata.

Tutte le immagini utilizzano come *layer* di sfondo le ortofoto fornite dal SIT della Regione Lombardia. Sul retro della scheda sono riportate le serie storiche di deformazione dei punti e un breve commento sui risultati ottenuti.

## **Conclusioni**

Attualmente è in corso lo studio dei risultati della sperimentazione che dovranno essere confrontati con le informazioni relative alla situazione di stabilità statico-strutturale degli edifici in questione rilevate attraverso i sopralluoghi condotti nelle campagne di catalogazione per la Carta del Rischio in Lombardia.



Tele-Rilevamento Europa

Responsabile: Alessandro Ferratti  
Operatore: Jacopo Allievi



Committente: Regione Lombardia

21 Novembre 2003

Determina Numero:

## Progetto di monitoraggio dei monumenti nell'area di Milano e provincia effettuato attraverso la Tecnica dei Diffusori Permanenti

Monumento Numero	4728
Nome	Duomo
Ubicazione	Milano, Piazza del Duomo
Area Elaborata [Km <sup>2</sup> ]	0,1

Dati ESA ERS-1 ed ERS-2	
Num. PS Track 487	□ 8
Num. PS Track 480	△ 7
Num. PS Track 208	○ 3

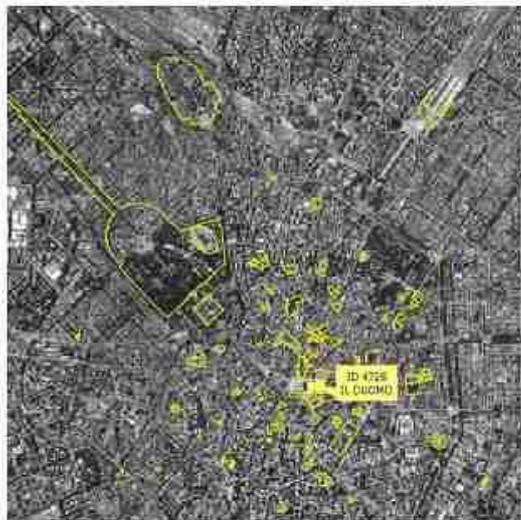


Figura 1: Identificazione del monumento monitorato sovrapposta ad Ortofoto fornita dalla Regione Lombardia.

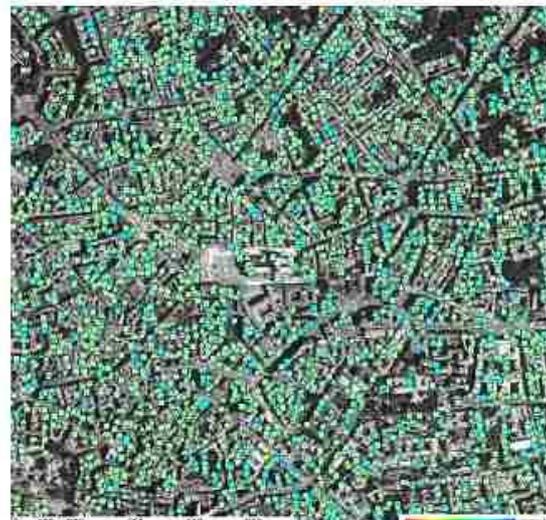


Figura 2: Ortofoto dell'area adiacente il Duomo. Posizione e velocità di deformazione dei capisaldi individuati. I valori stimati sono inferiori a 1 mm/anno.



Figura 3: Il Duomo, identificazione dei capisaldi e loro velocità media di deformazione, sovrapposti a Ortofoto Regionale.



Figura 4: Il Duomo, Abside vista dal lato nord. Sono stati individuati molti capisaldi radar: possono essere identificati con le numerose superfici riflettenti, come ad esempio le guglie, di cui il duomo è ricco.

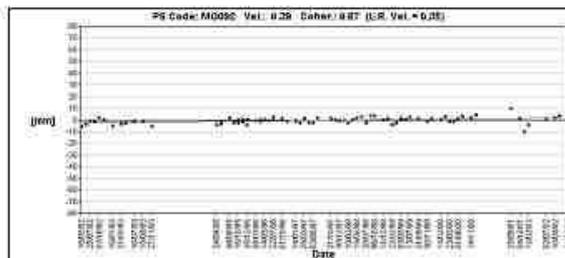


Figura 1: Serie storica del punto MG092.

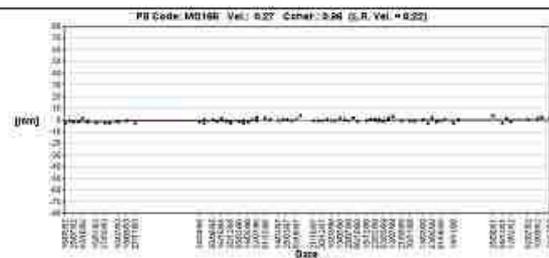


Figura 2: Serie storica del punto MG166.

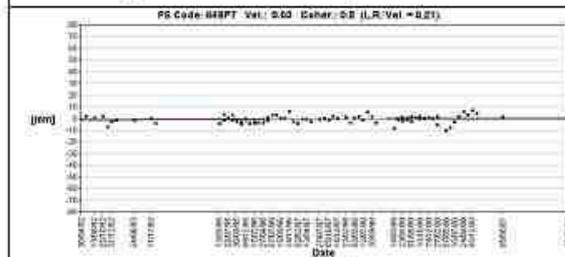


Figura 3: Serie storica del punto 64SPT.



Figura 4: Serie storica del punto 64UTE.

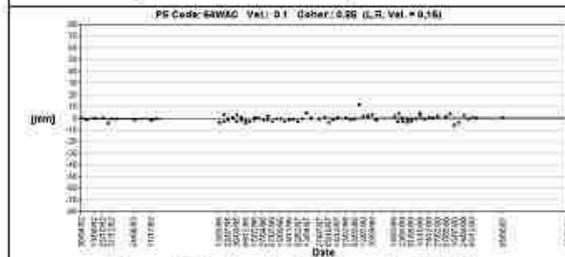


Figura 5: Serie storica del punto 64WAC.

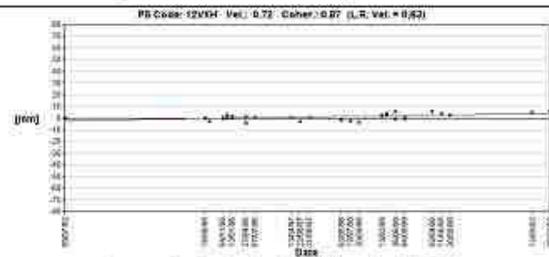


Figura 6: Serie storica del punto 12VXH.

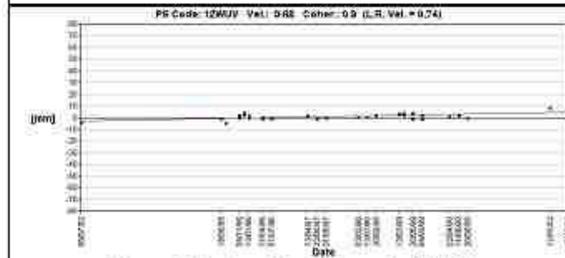


Figura 7: Serie storica del punto 12WUV.

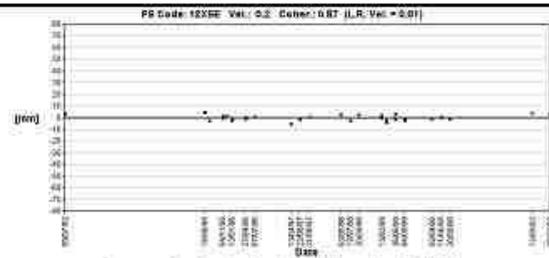


Figura 8: Serie storica del punto 12XSE.

### Commento

La zona adiacente il Duomo, come si può notare dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, è caratterizzata da una grande quantità di capisaldi radar. Le velocità di deformazione di questi benchmarks, in valore assoluto, si mantengono sotto 1 mm/anno.

In particolare i capisaldi radar individuati in corrispondenza del Duomo si distribuiscono lungo tutto il perimetro dello stesso e risultano concentrati nella parte più a Nord, sia nell'abside che lungo i fianchi della fabbrica. Essi rispecchiano la situazione di movimento descritta precedentemente. Le serie storiche di deformazione, da **Figura 1** a **Figura 8**, dei capisaldi radar selezionate mettono in luce la totale assenza di movimento sul manufatto. Lo scatteratore permanente affetto dalla maggiore quantità di movimento risulta essere il punto identificato con il codice 12VXH, in **Figura 6** soggetto a un movimento di innalzamento e con una velocità di deformazione pari a 0,74 mm/anno.

In conclusione quindi si può affermare che il Duomo non è soggetto a moto differenziale all'interno della sua struttura e inoltre che il moto dello stesso non differisce da quello dei capisaldi radar ad esso prossimi come mostra la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**