

WHERE

MONITORAGGIO DI SITI ARCHEOLOGICI DA SATELLITE

di Renzo Carlucci, Alessio Di Iorio, Alessandro Placidi, Massimo Pichini

Un sistema per il monitoraggio dei siti classificati patrimonio dell'umanità dall'UNESCO in ambito urbano basato sull'osservazione della Terra dallo spazio. Utilizzando e processando le immagini satellitari ad alta risoluzione, offerte dalla costellazione Cosmo Sky-Med, è possibile monitorare in tempo reale il sito sotto osservazione, con particolare riguardo all'impatto antropico, meteorologico e strutturale.

I satelliti Cosmo Sky-Med hanno come principale area di osservazione quella del Mediterraneo, regione considerata la 'culla' della civiltà occidentale, uno dei centri più importanti nello sviluppo della civiltà umana, con la più alta concentrazione di siti storico-archeologici del mondo. Le tecniche di telerilevamento satellitare, in cui l'utilizzo di sensori attivi SAR ad alta risoluzione consentono di monitorare la zona sotto osservazione in qualsiasi condizione, possono essere applicate al monitoraggio di siti archeologici, così come accaduto nel progetto WHERE (*World HERitage monitoring by Remote sEnsing*) il cui obiettivo è quello di monitorare siti UNESCO in aree urbane, attraverso l'utilizzazione e il processamento di immagini satellitari. In particolare, il monitoraggio riguarderà tre differenti elementi: antropici (impatto umano sul sito e sull'ambiente circostante); meteorologici (impatto ambientale e climatico sulla vulnerabilità dei monumenti); geotecnico-strutturali (deformazione di terreni e strutture architettoniche). I dati acquisiti da Remote Sensing vengono elaborati tramite tre distinte catene di processamento dati, denominate rispettivamente *change detection*, *microclimate* e *interferometry*. I dati processati così ottenuti sono integrati in un sistema GIS/WebGIS che include funzioni di analisi multitemporale delle informazioni ricavate dalle immagini satellitari, tali funzioni permettono di: evidenziare variazioni spaziali delle strutture e degli agglomerati urbani sotto osservazione con cadenza periodica a breve termine (settimanale/mensile); predisporre sistemi di segnalazione tempestiva; compilare mappe di vulnerabilità dei siti e osservare l'evoluzione dei parametri sotto monitoraggio.

Gli elementi antropici sono monitorati tramite tecniche di *change detection*, volte a individuare variazioni spaziali nei rapporti tra edifici, strutture e terreni circostanti, con particolare riferimento alle variazioni del tessuto urbano e alla presenza di lavori (scavi per sottoservizi, movimento terra, ecc). Inoltre le tecniche di *change detection* possono consentire l'individuazione di strutture sepolte subito sotto la superficie. Gli elementi meteorologici vengono monitorati con particolare riferimento a: temperatura del suolo, livello delle particelle in sospensione (aerosol), umidità e temperatura dell'aria. Questi parametri sono quindi utilizzati per determinare indici di: erosione, stress fisico e annerimento dei monumenti sotto osservazione. Inoltre i dati raccolti possono essere utilizzati per il monitoraggio ambientale delle stesse aree urbane.

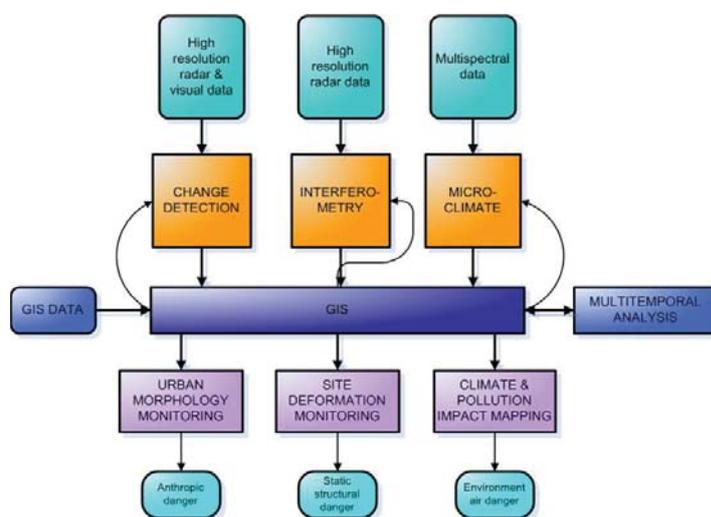


Figura 1 - Schema generale del sistema.

Gli elementi geotecnico-strutturali riguardano l'individuazione di deformazioni potenziali o in atto dei terreni sui quali le strutture incidono, dovute a fenomeni naturali e antropici. Nel caso del progetto WHERE, sono stati individuati tre differenti siti UNESCO nei quali il sistema sarà verificato e successivamente validato:

- Il Centro Storico di Roma, le proprietà extraterritoriali della Santa Sede nella città e San Paolo fuori le Mura (sito UNESCO dal 1980) con parziale copertura del Parco Archeologico dell'Appia Antica. In particolare il monitoraggio riguarderà: temperatura del suolo, temperatura dell'aria, umidità, livello delle particelle in sospensione (particolato); monitoraggio di un'area soggetta a cambiamenti antropici (Parco Archeologico dell'Appia Antica); monitoraggio della stabilità dei siti mediante indagine interferometrica (su siti specifici come Palatino, Mura Aureliane, ecc.) (Fig. 2).
- I Sassi e il Parco delle Chiese Rupestri di Matera (sito UNESCO dal 1993). Il progetto ha come obiettivo il monitoraggio della temperatura del suolo, temperatura dell'aria, umidità, livello delle particelle in sospensione (particolato); monitoraggio di un'area soggetta a cambia-



Figura 2 - Roma: particolare dei Mercati di Traiano.

menti antropici (su siti specifici come le Chiese Rupestri); monitoraggio della stabilità dei siti mediante indagine interferometrica (Fig. 3).

- Villa Adriana, Tivoli (sito UNESCO dal 1999) o in alternativa il Porto antico di Ostia. In questo caso gli obiettivi del progetto sono indirizzati alla ricerca di strutture archeologiche sepolte o parzialmente sepolte, con successiva verifica dei risultati; inoltre al monitoraggio della stabilità del sito mediante indagine interferometrica (Fig. 4).



Figura 3 - Sassi di Matera.



Figura 4 - Villa Adriana, Tivoli (Roma).

CHANGE DETECTION

Per quanto riguarda il monitoraggio di siti archeologici, uno dei metodi di *change detection* utilizzati riguarda l'applicazione di algoritmi di rilevamento di forme (*shape detection* o *template matching*) su immagini multitemporali ad altissima risoluzione sovrapposte ed integrate in ambiente GIS. L'operatore *shape matched* rappresentante la 'forma' cercata, già verificata in accordo con gli esperti del settore, è applicato all'immagine satellitare per produrre una densità di probabilità idonea a identificare l'ubicazione più probabile della struttura da ricercare. Il prodotto finale del processamento viene quindi integrato in un sistema GIS nella forma di differenti livelli (layers), trasformati in uno stesso sistema geografico di riferimento. Il risultato di tale processo è la visualizzazione dei cambiamenti antropici intervenuti nel sito monitorato, nel lasso di tempo intercorso tra le varie acquisizioni delle immagini satellitari. L'operatore *shape matched* è stato sviluppato nell'ambito del progetto HORUS (*Heritage Observation and Retrieval Under Sand*) realizzato in Egitto, con lo scopo di scoprire nuovi siti, proteggere quelli esistenti, identificare quelli perduti e monitorare gli scavi illegali in un'area prevalentemente desertica; è stata, quindi, dimostrata l'efficacia della metodologia prescelta (per approfondire l'argomento Archeomatica, Anno I - Numero IV).

Il metodo proposto si è rivelato di particolare efficacia, soprattutto nei seguenti casi:

- Identificazione di forme: in cui è generato un file di rilevazione (*detection layer file*) costituito da un'immagine dove è indicata la locazione più probabile della forma ricercata. Altre possibili locazioni, ricadenti entro un certo range di probabilità, vengono allo stesso modo indicate (Fig. 5).
- Monitoraggio di scavi illegali: in questo caso non si dispone di una forma da ricercare ma di un set di immagini acquisite in precedenza (serie storica). Viene quindi generato un modello di deformazione relativa risultante dalle immagini componenti il set d'ingresso, che può evidenziare la presenza di nuovi scavi archeologici (Fig. 6).
- Identificazione di strutture sepolte: nel caso di strutture archeologiche rinvenute in passato, ma attualmente ricoperte o perdute, di cui si conosce approssimativamente la posizione; utilizzando una mappa storica della struttura da ricercare e dove è nota, seppure non in dettaglio, l'area (Fig. 7).



Figura 5 - Esempio dell'applicazione dell'algoritmo optimal edge su immagine pancromatica Ikonos (Fayoum, Egitto) e corrispondente detection layer.

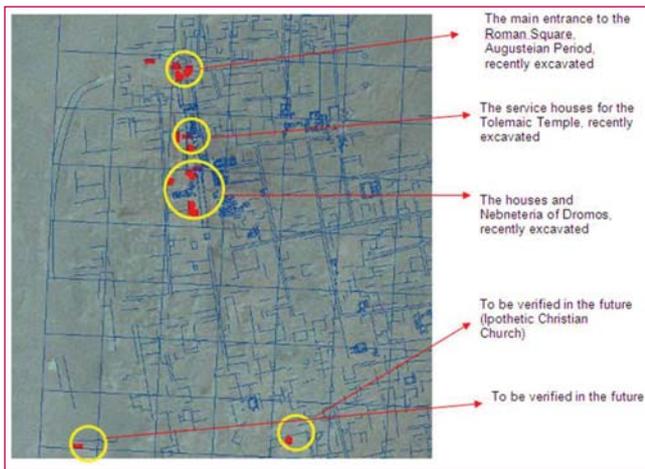


Figura 6 - Esempio dell'applicazione dell'algoritmo optimal edge utilizzato per analisi multitemporale su immagine Ikonos dove sono evidenziate le variazioni intervenute.

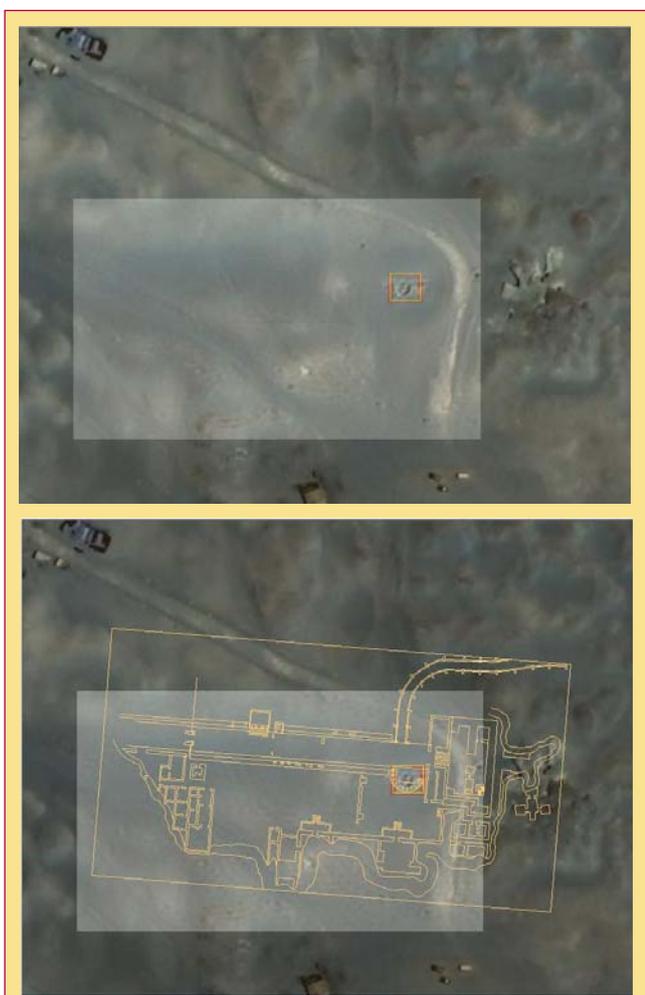


Figura 7 - Esempio di applicazione dell'algoritmo optimal edge utilizzato per l'identificazione di strutture parzialmente ricoperte dalla sabbia: nell'immagine a destra è sovrapposta la mappa del sito archeologico.

Il processo di rilevamento forme *shape detection* consiste di tre fasi distinte: definizione della forma 2D da ricercare; preparazione dell'operatore, in cui si convertono i dati della forma o struttura (file TIFF) che l'algoritmo prova a ricercare sulla scena telerilevata; rilevamento della forma, in cui i vari strati delle immagini satellitari sono processati con il *kernel* definito dall'operatore di riconoscimento, individuando le località più probabili per la presenza della forma o struttura ricercata (Fig. 8).



Figura 8 - Processo di costruzione dell'operatore a partire dalla forma selezionata.

La tecnica di *template matching* deve essere inoltre estesa ed adattata alle peculiarità dei siti localizzati in aree ad alta densità di urbanizzazione e all'utilizzo di dati radar acquisiti dalla costellazione Cosmo Sky-Med. Tali immagini ad altissima risoluzione, comparabile a quella dei sensori ottici (1 m in modalità spotlight) e provenienti da sensori attivi, consentono l'osservazione del sito sotto qualsiasi condizione (diurna, notturna e con qualsiasi copertura nuvolosa), permettendo inoltre una penetrazione limitata del suolo (da 3 a 15 cm in banda X) e derivando mappe di umidità differenziale che possono evidenziare strutture sepolte. L'applicazione dell'operatore *optimal edge* su immagini SAR deve tener conto della natura attiva del sensore e della forma dell'oggetto sotto osservazione. A partire da una descrizione geometrica dell'oggetto ricercato e dai dati di ripresa della scena SAR, è costruito un modello di come il satellite vedrebbe tale forma; a questo scopo il sistema include un modello 3D della forma acquisita dal GIS, per tener conto delle riflessioni delle onde radar sulla struttura (Fig 9).

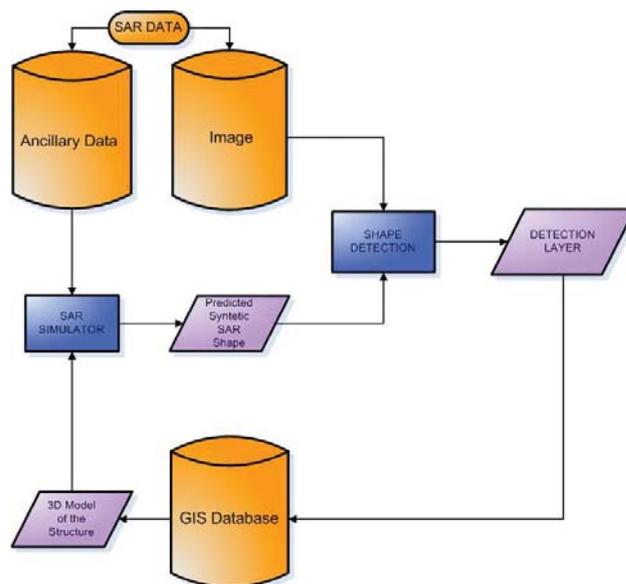


Figura 9 - Applicazione dell'operatore shape detection utilizzando il simulatore SAR di forme.

MICROCLIMATE

Lo studio e il monitoraggio del microclima si rivela di particolare importanza nella conservazione dei beni culturali: molti studi hanno infatti dimostrato che non solo stucchi, affreschi e ceramiche, ma anche pietre, mattoni e altri materiali costruttivi sono molto sensibili ai cambiamenti microclimatici, in particolare riguardo a:

- Temperatura: variazioni di temperatura inducono differenti espansioni nei materiali e sforzi di tensione tra le superfici e le strutture sottostanti; variazioni cicliche di temperatura possono quindi danneggiare i materiali archeologici. Informazioni relative ai cicli di temperatura giornalieri risultano perciò di maggiore importanza rispetto a quelle sui cicli stagionali. Nel caso del progetto WHE-

RE la temperatura del suolo sarà stimata mediante analisi multiscala e multisensore utilizzando dati ASTER (e quando non disponibili, dati MODIS); la temperatura dell'aria vicina alla superficie sarà stimata utilizzando dati MODIS (e quando non disponibili, dati Sentinel 3).

- **Umidità:** alti livelli di umidità aumentano il tasso di deterioramento dei materiali; la presenza di acqua allo stato liquido favorisce reazioni chimiche come la trasformazione di marmo o rocce calcaree in gesso. Variazioni di temperatura provocano un maggiore o minore assorbimento di acqua dei corpi, con conseguenti espansioni o contrazioni che possono danneggiare i materiali. Nell'ambito del progetto in esame, il monitoraggio dell'umidità utilizzerà dati MODIS (e quando non disponibili, dati Sentinel 3).
- **Aerosol:** la conoscenza e il monitoraggio delle particelle in sospensione (particolato) e la loro relativa abbondanza in atmosfera riveste particolare importanza per la comprensione dei fattori di degrado del patrimonio culturale. Tale degrado dipende infatti anche dalla qualità e quantità di inquinanti depositati, dal modo in cui le superfici sono inumidite, da frequenza e durata dell'umidificazione, in aggiunta a fattori intrinseci strutturali (natura e robustezza del materiale, rugosità superficiale, porosità). Nell'ambito del progetto WHERE, ad esempio, la tematica è affrontata utilizzando dati MODIS (tramite il prodotto PM MAPPER e i risultati di altri progetti finanziati dall'ASI, come ad esempio QUITSAT) e valutazioni su dati PRISMA simulati (Fig. 10).

I dati e le informazioni raccolte verranno successivamente elaborati all'interno del GIS, analizzando la pericolosità quale componente del rischio che descrive il processo fisico di deterioramento dei beni monumentali. In particolare saranno trattati tre distinti ed indipendenti indici chimico-fisici: indice di erosione, indice di stress-fisico e indice di annerimento.

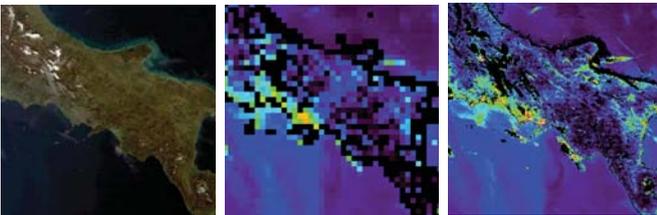


Figura 10 - Esempio di processing di mappe di AOT.

INTERFEROMETRY

Il monitoraggio della stabilità strutturale dei monumenti si rivela di particolare importanza al fine di predisporre interventi preventivi piuttosto che di messa in sicurezza, soprattutto nel caso di aree ad alta densità di urbanizzazione dove numerosi fattori incidono nel deterioramento delle strutture, fino a causare danni irreversibili come crepe, cedimenti e crolli. La metodologia si basa sul processamento di dati radar interferometrici ad alta risoluzione (DInSAR), relativi ad aree pertinenti o circostanti i siti UNESCO. I dati raccolti sono utilizzati per implementare una procedura di elaborazione interferometrica finalizzata all'individuazione e alla mappatura di aree interessate da fenomeni di dissesto o modifiche del terreno, che rappresentino criticità per la salvaguardia del sito. I dati vengono acquisiti da sensori radar attivi tipo Cosmo Sky-Med, che permettono di operare su immagini ad alta risoluzione (circa 3 m) e con alta frequenza di rivisitazione in ogni condizione atmosferica. Ciò consente un monitoraggio periodico a breve termine dei monumenti e quindi la tempestiva individuazione di eventuali criticità strutturali. Il sistema sviluppato è basato sull'elaborazione di coppie di immagini SAR e finalizzato

IL PROGETTO WHERE

Il progetto WHERE verrà sviluppato in un arco temporale di diciotto mesi e sarà gestito applicando le metodologie classiche utilizzate per la realizzazione di un prodotto industriale. Il team intende realizzare un dimostratore finale con le caratteristiche principali di un prodotto industriale, per arrivare in tempi brevi e con un minimo ulteriore investimento sul mercato. La documentazione e il ciclo di vita del progetto saranno gestiti in accordo agli standard definiti dall'Agenzia Spaziale Europea (ECSS: *European Cooperation on Space Standardization*) per la realizzazione di progetti in ambito spaziale. La struttura organizzativa è composta da un team comprendente *prime contractor*, partners, sottocontrattori e consulenti che copriranno ogni aspetto specifico delle attività da svolgere; le tecniche proposte si basano su background consolidati ed i nuovi sviluppi saranno focalizzati su tematiche ben specifiche, su cui è stata già eseguita un'analisi di fattibilità preventiva.

Il team proponente:

NEXTANT S.p.a., responsabile del coordinamento e del controllo delle attività eseguite e dello sviluppo della catena di processamento *change detection*, per la quale si avvarrà della consulenza specialistica di ALMA SISTEMI Sas per gli algoritmi di *change detection* e analisi multitemporale e GIS MEEO S.r.l. per la componente di monitoraggio atmosferico e meteorologico (incluso l'inquinamento) e per la copertura del suolo SURVEYLAB per la componente di monitoraggio della stabilità strutturale A&C2000 S.r.l. per la partecipazione nella valutazione iniziale dei requisiti, nell'acquisizione di dati cartografici di base e nella progettazione del sistema GIS.

Il progetto WHERE si rivolge al settore dei Beni Culturali. Il modello di servizio proposto è basato sull'applicazione di un monitoraggio continuo dei beni monumentali ed archeologici che guiderà una serie di interventi di restauro *leggeri*, contrapposto al modello classico di intervento di carattere straordinario, che ha un impatto economico notevolmente superiore.

La manutenzione preventiva continua, permessa da informazioni puntuali sullo stato di degrado del bene monitorato, ha infatti un costo economico decisamente inferiore rispetto al modello *riabilitativo*. Studi effettuati dal MiBAC hanno dimostrato che il modello *preventivo* può portare a una riduzione del volume di spesa per il restauro stimata del 30% rispetto alla normale spesa annua. A questa andrebbe aggiunto un ulteriore 10% di riduzione commerciale, abilitando contratti di servizio continuati nel tempo ma *a chiamata*, sulla base delle mappe di deterioramento dei siti sotto monitoraggio.

alla rilevazione di possibili cambiamenti attraverso l'analisi di mappe di coerenza (costruzione di manufatti, scavi non segnalati, allagamenti ecc.) e di fenomeni deformativi in atto attraverso l'analisi di interferogrammi differenziali. È possibile inoltre applicare metodologie interferometriche multitemporali per il monitoraggio di fenomeni deformativi superficiali in aree urbane a partire da serie storiche di immagini; vengono inoltre sperimentate procedure per la generazione di mappe di velocità e serie storiche di deformazione.

L'Interferometria Differenziale Radar ad Apertura Sintetica (DInSAR) è una tecnica che sfrutta la differenza di fase (interferogramma) tra due immagini SAR complesse, relative a una specifica area osservata, ottenute processando i dati acquisiti da due antenne. Tale tecnica permette di stimare le deformazioni di una zona della superficie terrestre analizzando la differenza di fase tra due immagini acquisite in due istanti di tempo differenti (*along-track baseline*). Rimossi i disturbi atmosferici, una perdita di coerenza tra pixels di due immagini acquisite in epoche diverse può essere attribuita a un cambiamento delle condizioni superficiali, per cause naturali (vegetazione, contenuto d'acqua, dilavamento ecc.) ovvero antropiche (costruzione di manufatti, scavi, ecc.).

I risultati della catena di processamento interferometrica verranno successivamente convertiti in layers del sistema GIS per produrre mappe dettagliate delle variazioni rilevate; inoltre saranno inseriti nel sistema livelli informativi relativi alle misure di controllo dirette disponibili, ad esempio topografici (livellazione geometrica o misure di controllo), geotecnici (inclinometri, piezometri, ecc.) o strutturali (fessure metri, ecc.) che abbiano già permesso di evidenziare cedimenti o danni strutturali sui singoli edifici.

GIS E WebGIS

Il sistema permette di erogare informazioni attraverso un'interfaccia grafica web-based, con le funzioni di navigazione, ricerca e visualizzazione delle informazioni territoriali raccolte e modellizzate. Sulla raccolta degli indicatori riferiti alle cartografie e immagini di base sarà costruito il modello GIS per le attività di pubblicazione e consultazione, strutturato nei seguenti componenti:

- modulo WebGIS
- DB della copertura geografica
- mappe di sfondo (strade, ferrovie, acque, limite delle aree boschive e urbane)
- immagini di sfondo (ortofoto, foto satellitari)
- interfaccia di navigazione geografica

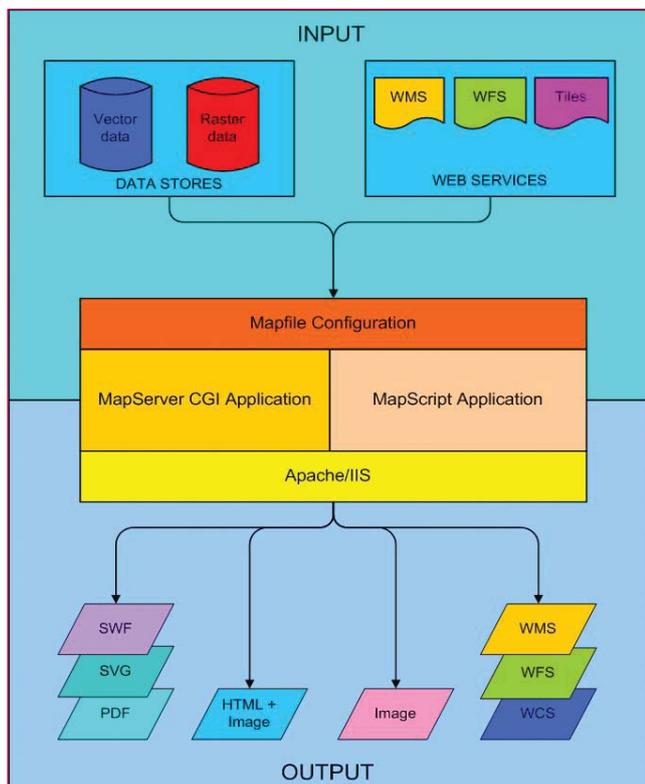


Figura 11 - Architettura del sistema GIS.

Il modulo GIS per la consultazione di informazioni geografiche fornirà i seguenti servizi e funzioni:

- archiviazione delle informazioni geografiche in DB spaziale (GeoDB)
- pubblicazione su web delle informazioni geografiche archiviate nel GeoDB
- funzioni di *panning* sulle mappe web generate
- funzioni di abilitazioni dei layers informativi creati
- funzione di zoom delle mappe
- funzione di ipostazione della scala di rappresentazione delle mappe
- interrogazione delle informazioni alfanumeriche

CONCLUSIONE

Il sistema qui presentato ha come obiettivo primario lo sviluppo di un servizio innovativo per il monitoraggio dei beni culturali, come nel caso dei siti UNESCO in ambiente urbano. Tale sistema si caratterizza inoltre per l'integrazione dei tre aspetti fondamentali della carta del rischio dei beni culturali del MiBAC: rischi antropici, meteoroclimatici e strutturali. A causa di un più generale degrado ambientale, negli ultimi decenni il deterioramento delle strutture archeologiche è andato aumentando, rendendo perciò sempre più necessaria un'opera di monitoraggio e manutenzione dei siti. La metodologia qui esposta si pone in linea con le direttive del MiBAC in materia di monitoraggio ed interventi di restauro in quanto favorisce l'adozione di modelli d'intervento *leggero* (con frequenza legata ai parametri soggetti a monitoraggio) piuttosto che interventi *pesanti* (ad elevato impatto economico e che in alcuni casi non garantiscono la preservazione del bene). Il servizio di monitoraggio proposto è reso possibile dalla capacità della costellazione Cosmo Sky-Med di operare con tempi brevi di rivisitazione, con qualsiasi condizione meteorologica e con alta risoluzione; si propone inoltre di sviluppare specifici elementi tecnologici innovativi nelle aree di *change detection*, *microclimate* e *interferometry*. Il monitoraggio dei siti storico-archeologici basato sul processamento di immagini satellitari si propone quindi come uno strumento ad uso della Pubblica Amministrazione per il monitoraggio del patrimonio monumentale ed archeologico in aree urbane; fornisce inoltre, come valore aggiunto, il monitoraggio ambientale delle aree selezionate (come nel caso della qualità dell'aria in aree urbane) complementare, se non sostitutivo, delle reti a terra. Si configura infine come ausilio in termini di contenimento sia dei rischi naturali (subsidenze, variazioni microclimatiche ecc.) che di quelli antropici (inquinamento, urbanizzazione ecc.).

Progetto finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana nell'ambito del Secondo Bando riservato alle PMI, avente come tematica "Osservazione della Terra" - anno 2010.

ABSTRACT

AUTOMATIC MONITORING OF WORLD HERITAGE UNESCO SITES BY USING AND PROCESSING SATELLITE IMAGERY

Cosmo Sky-Med satellites offer active high resolution radar images; they are mainly devoted to observe the Mediterranean area, where is the highest density of archaeological sites in the world. Satellite detection techniques can therefore be used for automatic monitoring of archaeological sites. A specific case discussed in this paper is the project WHERE, that focuses on the monitoring of World Heritage UNESCO sites located in urban areas, by using and processing satellite imagery. Monitoring will concern three different elements: anthropic (human impact on the site and the environment), climatic (environmental and climatic impact on monuments) and geotechnical/structural (terrain and architectural structures deformation) and will employ three distinct chains of data processing, namely change detection, microclimate and interferometry. Information obtained is then superposed in a GIS/WebGIS environment. Such service is based on a continuous monitoring (with all weather conditions) of archaeological sites, that enables a series of light restoration interventions, instead of traditional heavy ones that have a higher economical expense and not always ensure Cultural Heritage preservation.

PAROLE CHIAVE

Monitoraggio del sito archeologico, Telerilevamento, Cosmo-Sky-Med, SAR, GIS, UNESCO.

AUTORE

ALESSIO DI IORIO - ALMA_SISTEMI@TISCALI.IT
ALESSANDRO PLACIDI - ALEXANDERP@ALICE.IT
ALMA SISTEMI SAS

RENZO CARLUCCI - RCARLUCCI@AEC2000.EU
A&C2000 S.R.L.

MASSIMO PICHINI - MASSIMO.PICHINI@NEXTANT.IT
NEXTANT S.P.A. - ROMA - ITALIA

Light for Art



Laser for Conservation



SOLUZIONI tecnologiche per il RESTAURO

Il **Gruppo El.En. S.p.A.** contribuisce con i suoi sistemi laser alla conservazione del patrimonio storico e artistico ormai da due decenni, proponendo soluzioni sempre più innovative, sviluppate in collaborazione con i maggiori centri di ricerca nazionali. L'obiettivo dei ricercatori del **Gruppo El.En.** è quello di fornire ai restauratori la più completa e avanzata gamma di prodotti da impiegare sia in laboratorio che in cantiere nelle più diverse e difficili condizioni di lavoro. Affidabilità, praticità, flessibilità, elevate prestazioni e la costante validazione in campo da parte dei maggiori esperti del settore della conservazione, fanno sì che i sistemi laser del **Gruppo El.En.** siano i più diffusi e vengano impiegati nei più importanti cantieri di restauro in Italia e all'estero.