

# MONITORAGGIO DI SITI ARCHEOLOGICI DA SATELLITE

UN METODO IBRIDO TRAMITE REMOTE SENSING, TECNICHE GIS E UN ALGORITMO DI RILEVAMENTO DELLA FORMA UTILIZZABILE SU IMMAGINI SAR

di Renzo Carlucci e Alessio Di Iorio



Il metodo sviluppato nel quadro di un progetto finanziato dall'Agenzia Spaziale Europea per il monitoraggio automatico e l'identificazione di siti archeologici perduti o ancora da scoprire in Egitto è stato ulteriormente migliorato tramite i dati disponibili da immagini radar di tipo SAR ad alta risoluzione in banda X dei satelliti Cosmo Sky-Med.

Nel campo del telerilevamento l'utilizzo di sensori attivi ad alta risoluzione consente di continuare a monitorare la zona di destinazione in qualsiasi condizione (giorno, notte o con qualsiasi copertura nuvolosa) e i satelliti Cosmo Sky-Med sono principalmente rivolti ad osservare l'area del Mediterraneo ('Med' in realtà è sinonimo di Mediterraneo), dove si trova la più alta densità di siti archeologici del mondo. Il metodo sviluppato nell'ambito del progetto HORUS (*Heritage Observation and Retrieval Under Sand*) utilizza tecniche di rilevazione di forma su immagini satellitari confrontate in un ambiente GIS. Per una specifica zona di interesse si pre-trattano i dati disponibili da vari satelliti sulla base della forma della struttura di interesse archeologico ricavata da mappe preesistenti, anche storiche. Un algoritmo di rilevamento di forme *shape detection algorithm*, che utilizza un operatore di ricerca di tipo *shape-matched*, viene applicato all'immagine satellitare per produrre un'immagine che rappresenta la densità di probabilità *detection image* atta ad identificare l'ubicazione più probabile della struttura archeologica di interesse. L'operatore *shape-matched* impiegato utilizza la derivata del doppio esponenziale (DODE). Il prodotto finale del processamento viene integrato in un sistema GIS nella forma di differenti livelli (layers) trasformati in uno stesso sistema geografico di riferimento. Il lavoro di seguito descritto è stato eseguito nell'ambito di una ricerca a seguito delle risultanze del progetto *ESA Data User Element (DUE) Innovator User Partnership: Heritage Observation and Retrieval under Sand*, (HORUS), finanziato dall'Agenzia Spaziale Europea.

#### REQUISITI DEGLI UTENTI FINALI E SCENARI DELLA SPERIMENTAZIONE

Il progetto HORUS da cui si è partiti, si è avvalso di una collaborazione con l'Egitto tramite il suo Centro di Documentazione del Patrimonio Culturale e Naturale (CULTNAT), che svolge un compito importante per la conservazione e la gestione del patrimonio archeologico egiziano, reso più difficile dal numero enorme di siti che sono distribuiti in tutto il paese e per il ritmo crescente della urbanizzazione nelle vicinanze dei siti archeologici. Le attuali pratiche e le risorse disponibili non consentono l'analisi e il controllo di tutte le aree archeologiche in Egitto. Unendo la conoscenza storica e l'esperienza dell'utente finale con le proposte procedure satellitari, HORUS ha prodotto un'aspettativa di ridurre i costi e il tempo necessario a scoprire nuovi siti e a proteggere quelli esistenti. In particolare, un servizio richiesto dall'utente finale è stato per l'identificazione di siti perduti, nel senso che sono già stati scavati ma non adeguatamente documentati e ora ricoperti di nuovo di sabbia. Un altro servizio individuato è legato all'attività di monitoraggio per identificare scavi illegali di siti archeologici. I risultati preliminari ottenuti e valutati da parte dell'utente finale nella cornice del progetto HORUS hanno indicato che l'approccio è praticabile e vantaggioso. I risultati successivamente ottenuti come avanzamento di tale progetto, utilizzando nuovi dati ad alta risoluzione radar, dimostrano la fattibilità di un servizio di ricerca e monitoraggio in Egitto e in generale in tutta l'area del Mediterraneo, dove si trova la maggior parte del patrimonio mondiale. Sono stati sperimentati diversi scenari in cui erano note le posizioni più o meno approssimate di siti archeologici descritti da planimetrie storiche con vari gradi di precisione, tenendo anche presente che la pratica archeologica si avvale di informazioni raccolte sulla presenza probabile di strutture presenti in una determinata regione. Un'area geografica rappresentativa per tale sperimentazione è stata il sito di Saqqara, situato a circa 25 km a sud-ovest dal Cairo, indicato come sito di riferimento data la grande quantità di dati esistenti.

Analogamente si è effettuato un altro test nella regione del Fayoum nel sito di Medinet Madi.

#### DESCRIZIONE DEL PROCESSO

Il processo sperimentato si avvale di una preventiva ricerca di archivio di mappe storiche e disegni delle strutture archeologiche di interesse a seguito della quale si attivano le seguenti fasi:

- Selezione delle immagini satellitari, acquisizione e pre-trattamento;
- Costruzione dell'operatore di riconoscimento *shape matched* per le forme da rilevare;
- Integrazione nel Sistema Informativo Geografico (GIS).

I dati storici relativi alle aree di interesse reperiti dall'utente finale, hanno in particolare riguardato il complesso del Serapeum a Saqqara, scoperto dall'archeologo francese A.E. Mariette nel 1850. I disegni storici del complesso, quali quelli mostrati in figura 1, sono stati integrati, in funzione della disponibilità di disegni dei più recenti scavi, come in figura 2.

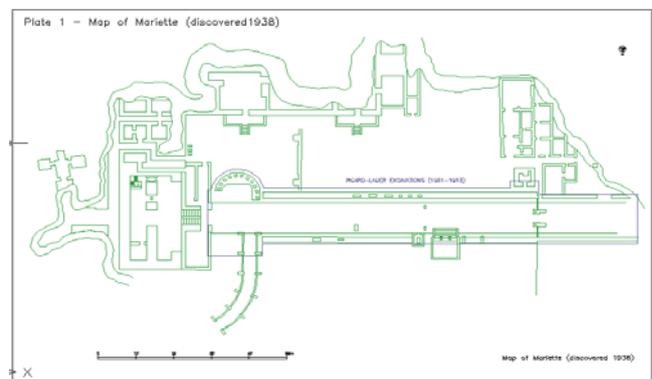


Figura 1 - Picard, scavi Lauer 1951/53.

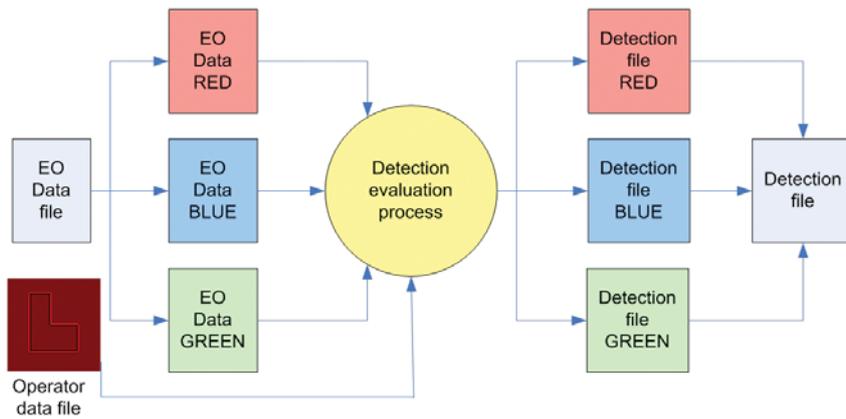
#### SELEZIONE DELLE IMMAGINI SATELLITARI, ACQUISIZIONE E PRE-TRATTAMENTO

L'approccio adottato per la selezione di dati satellitari è stato quello di includere tutti i dati che potrebbero contribuire alla scoperta di antiche strutture sotto la sabbia. Essendo noto che il radar in banda L e in banda C ha capacità di penetrazione specialmente nella sabbia asciutta, nel quadro del progetto HORUS si è indagato l'uso di immagini radar ad apertura sintetica (SAR), quali quelle in banda L generate dal JERS1 e le immagini SAR in banda C di ERS1, ERS2 ed Envisat. Ulteriori indagini su immagini SAR del satellite Cosmo SkyMed sono in corso, come descritto successivamente. Per le immagini satellitari acquisite nel campo ottico visibile è noto che strutture superficiali sommerse possono causare cambiamenti nella topografia, accumulo di sabbia, umidità o altre caratteristiche. Dati ottici ad altissima risoluzione (VHR), in forma di immagini QuickBird e Ikonos, sono stati utilizzati per convalidare rapidamente i risultati ottenuti. Prima di procedere alla ricerca delle forme, le immagini satellitari sono state calibrate, orto-rettificate e georeferenziate nel GIS dell'utente finale.



Figura 2 - Operatore di riconoscimento shape matched, fase di preparazione.

Figura 3 - Fasi di detenzione della forma.



### COSTRUZIONE DELL'OPERATORE DI RICONOSCIMENTO SHAPE MATCHED SULLE FORME DA RILEVARE

L'operatore *shape matched* atto allo scopo è stato derivato come espansione di uno *step edge filter (SEF)* ottimale per le cui spiegazioni di dettaglio si rimanda a Moon H., Chellappa R. and Rosenfield A., 2002. Si è esteso poi lungo i bordi di una forma, l'*optimal edge operator* secondo quanto meglio definito e spiegato in Iorio A., Bridgwood I., Rasmussen M., Sørensen M., Carlucci R., Bernardini F., Osman A.

### INTEGRAZIONE NEL GIS

I risultati intermedi del processo di rilevamento delle forme sono registrati su file di immagini, in questo caso in *Tagged Information File Format (TIFF)*, ove sono indicate le posizioni più probabili per la forma ricercata. Un file di dati risultanti dall'analisi definisce invece i valori dei pixel delle aree. I layers così ottenuti sono poi integrati in ambiente GIS ove possono essere combinati utilizzando funzioni aggiuntive e altre informazioni. L'integrazione tra GIS e la banca dati fornisce un ottimo strumento per ottimizzare le risorse da spendere sul campo da parte dell'utente finale.

### PROCESSO DI RILEVAMENTO DELLE FORME

Il processo di rilevamento della forma si compone di due fasi distinte, una fase di preparazione dell'operatore e una fase vera e propria di rilevazione della forma. Lo scopo della fase di preparazione dell'operatore è quello di convertire il file contenente la forma derivato dalle informazioni fornite da parte dell'utente finale, nell'operatore di riconoscimento *shape matched* per l'uso nella fase di rilevazione delle forme.

Il file contenente la forma da ricercare è un file TIFF riprodotto in approssimazione la struttura architettonica da ricercare, in genere derivato da un disegno storico, digitalizzando e eseguendo un successivo miglioramento dei bordi. L'immagine viene convertita in bianco e nero, per semplificare l'elaborazione successiva. Un algoritmo rileva poi il bordo della forma assegnando valori ai pixel, un bordo crescente in salita è rappresentato dalla coppia di pixel (1, -1) e un bordo discendente dalla coppia di pixel (-1, 1). Tutti gli altri valori dei pixel sono impostati a zero. Un operatore di *smoothing* viene applicato alle righe e alle colonne della risultante matrice dei confini della forma, generando in questo modo l'operatore di riconoscimento *shape matched* ottimale.

Nel processo di rilevamento della forma poi, i vari strati dei file TIFF delle immagini satellitari, ad esempio i diversi livelli RGB delle immagini ottiche, sono individualmente processati con il kernel definito dall'operatore di riconoscimento *shape matched* ottimale.

I risultati delle singole circonvoluzioni sono combinati individuando i valori massimi, corrispondenti alle località con la maggiore probabilità di presenza della struttura archeologica di interesse. Le posizioni della massima probabilità, che rientrano all'interno di un certo campo di valori massimi definiti dalla soglia del parametro relativo al livello di sensibilità presenti in un file XML associato, sono memorizzati in un file di dati e vengono evidenziati in un corrispondente file TIFF di rilevazione, che è integrato come un livello nel sistema GIS dell'utente finale.

### RISULTATI DI HORUS

L'applicazione è stata inizialmente testata per riconoscimento di forme con una struttura archeologica del sito di Medinet Madi, che era chiaramente visibile in una immagine ottica Ikonos, al fine di essere prontamente convalidata. È stato prodotto il file della forma, in cui la dimensione e l'orientamento della forma stessa sono noti. L'immagine satellitare utilizzata è una Ikonos del Fayoum - sito Medinet Madi. Tale immagine in figura 4 è visualizzata come parte di un set di dati ArcGIS con il disegno archeologico sovrapposto. L'applicazione dell'algoritmo sull'immagine genera un livello di rilevamento dove la regione che produce il massimo di risposta per l'operatore *shape matched* è evidenziato in giallo. Le risposte con i valori che ricadono all'interno di un intervallo di massima specificato sono evidenziate in rosso. Il nuovo layer generato con l'operatore di rilevamento forma è integrato nel set di dati GIS e sovrapposto agli altri. La figura 4 mostra un'area allargata del layer di rilevazione nel set di dati GIS con il risultato della ricerca posizionato correttamente ed evidenziato con un quadrato giallo.

Un test più rappresentativo è mostrato da figura 5 a figura 7, relativo al sito Medinet Madi.

Di particolare interesse per l'utente finale nella zona di Saqqara è il complesso del Serapeum, una galleria di tombe scavate nella roccia e che funge da luogo di sepoltura del toro sacro Api. Il complesso del Serapeum è approssimativamente collocato al centro di figura 8. Questo è stato riscoperto in tempi più recenti dall'archeologo francese A.E. Mariette durante gli scavi nel 1851. Ulteriori scavi di Mariette hanno rivelato il Dromos e l'approccio cerimoniale al Serapeum come mostrato in figura 2. Con poche eccezioni, come la disposizione a semicerchio di statue consociate

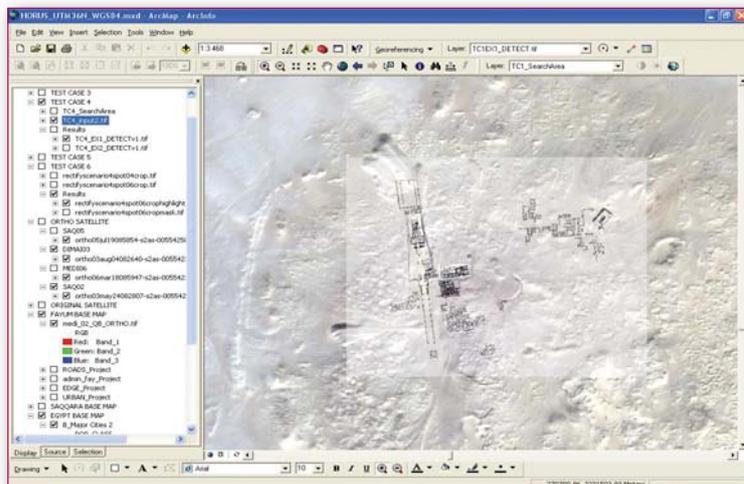


Figura 4 - Set di dati in ArcGIS che mostrano un'immagine IKONOS e la pianta archeologica della regione di Medinet Madi.



Figura 5 - Layer risultante applicando l'algoritmo di riconoscimento shape detection.

come *Philosoper' Circle*, la zona è ora sepolta sotto la sabbia di nuovo.

Per la validazione, la struttura semicircolare è stata cercata con l'utilizzo dell'operatore di riconoscimento associato alla forma richiesta nella regione di interesse, in un'immagine QuickBird.

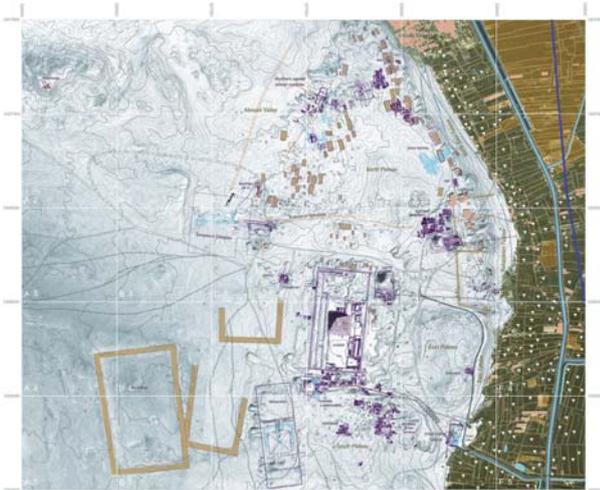


Figura 6 - Mappe della regione Saqqara.

Applicando l'algoritmo di rilevamento della forma si identifica correttamente la struttura come si vede nella zona allargata in figura 7. Utilizzando la struttura di forma derivata del *Philosophers' Circle*, la posizione del Serapeo può essere vista sovrapponendo il disegno della figura 2 realizzato da scavi precedenti.

Al fine di rivelare le caratteristiche sotto la sabbia, sono state considerate le immagini radar in banda L della superficie generate da JERS1. In figura 8 è riportata una immagine JERS1 in banda L della zona di Saqqara con una risoluzione di 12,5 m. I gradoni della piramide di Djoser si possono distinguere a destra del centro dell'immagine.

Dalla conoscenza della dimensione e della forma delle strutture del complesso Serapeo, come mostrato in figura 2, si può produrre un file di forma semplificato, figura 9.

L'applicazione ha identificato in modo univoco una regione che corrisponde alla regione del complesso del Serapeum.



Figura 7 - Individuazione del *Philosophers' Circle* sovrapponendo la documentazione di scavo di Picard Lauer.

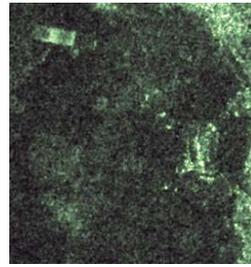


Figura 8 - Immagine Jers-1 della regione centrale di Saqqara intorno al complesso del Serapeum.

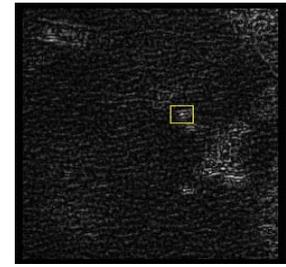


Figura 9 - Rilevazione del complesso del Serapeum.

### MIGLIORAMENTI SAR

A seguito delle missioni satellitari ad alta risoluzione come il radar TerraSAR-X e Cosmo SkyMed lanciati nel 2007, si dispone di immagini SAR prese dallo spazio che possono raggiungere risoluzioni spaziali inferiori al metro in azimuth e range. Tuttavia, l'analisi visiva delle caratteristiche che mostrano tali immagini è ancora difficile. Inoltre, il breve tempo di rivisitazione e la copertura della costellazione Cosmo SkyMed consente un servizio di monitoraggio quasi in tempo reale per diverse applicazioni. Ora, al fine di individuare i siti archeologici uno strato radar può essere aggiunto a quello ottico normale. Questo nuovo layer può aggiungere, a causa della coerenza della sorgente che illumina la scena, almeno tre diversi contributi:

- una migliore penetrabilità del radar sul suolo, soprattutto su terreni secchi (circa 3-10 cm in banda X a seconda dell'umidità del suolo) e un'analisi della fase del segnale riflesso *phase unwrapping*;
- generazione di una mappa di umidità del terreno;
- ricostruzione simulata della scena descritta e analisi di correlazione di essa o parte di essa sulla scena reale.

In caso di siti archeologici contenenti oggetti artificiali la decisione è di particolare interesse ove le caratteristiche dell'immagine sono causate da dispersione deterministica o casuale. Inoltre, la rilevazione di segnali riflessi speculari potrebbe aiutare a localizzare pixel luminosi stabili a lungo termine in immagini SAR che possono essere utilizzati nella *Persistent Scatter Interferometry* per rilevare spostamento a terra con accuratezze dell'ordine dei millimetri per anno.

Per sostenere l'interpretazione geometrica di immagini spaziali SAR e per la previsione degli effetti attesi per il fenomeno della diffusione del segnale riflesso (*scattering*) in immagini da acquisire è generata un'immagine simulata in grado di approssimare le riflessioni che appaiono sugli oggetti a terra. La conoscenza dell'orbita del satellite viene utilizzata per approssimare la geometria del processo di generazione dell'immagine che fornisce i dati accessori alla scena radar reale. Algoritmi di *Ray Tracing* sono migliorati ed adattati per seguire il segnale all'interno della scena. Sono simulati in 3D effetti di riflessione, ad esempio in azimuth, range ed elevazione. Quindi viene abilitata la separazione di diversi dispersori all'interno della stessa cellula di risoluzione. Il processo migliorato è illustrato nella figura 10.

L'operatore di riconoscimento utilizzato nelle immagini visibili, come definito nella precedente attività, viene iniettato nel simulatore SAR che genera il bersaglio simulato. L'algoritmo di ricerca viene quindi applicato alle immagini SAR generando l'immagine che rappresenta la densità di probabilità di identificazione (*detection file*) da sovrapporre alle mappe GIS. Per le prove effettive sono state usate due immagini Cosmo SkyMed delle piramidi di Giza (una ascenden-

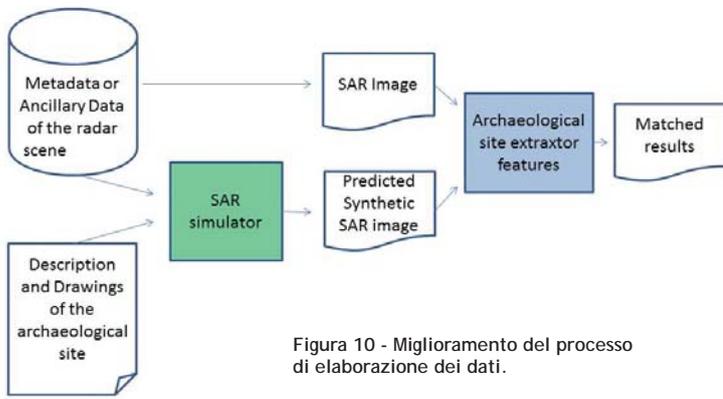


Figura 10 - Miglioramento del processo di elaborazione dei dati.

te e una discendente) come si vede nella foto qui sotto. L'oggetto di destinazione è stato estratto da un'immagine visiva già geometricamente corretta (una delle Piramidi). Il simulatore SAR ha prodotto l'immagine distorta di tipo radar (target simulato) e cercato nelle immagini di Cosmo SkyMed, utilizzando l'operatore di riconoscimento (*sha-*

*pe matched operator*). Qui di seguito sono raffigurati i tre passaggi necessari per produrre l'immagine sintetica sopra descritta.

Il primo test è stato eseguito con successo sei volte utilizzando due diversi modelli estratti da immagini visive e con simulazione in accordo ai dati di base collegati alle immagini SAR. Questo approccio sta dimostrando che il modello utilizzato nell'algoritmo di riconoscimento è abbastanza robusto da lavorare bene anche con le immagini, a patto che venga usato il simulatore SAR per produrre l'operatore di riconoscimento delle forme (*shape operator*). Ulteriori test, ancora in corso, coinvolgono altri aspetti interessanti che saranno analizzati nel prossimo futuro, come l'invarianza di scala, l'orientamento e l'ombreggiatura. Questi parametri riguardano sia gli aspetti geometrici che radiometrici e possono rendere più critico il riconoscimento del *pattern* ricercato. Le prestazioni sono comunque molto influenzate, a seconda dell'algoritmo adottato.



Figura 11 - Immagine SAR della piramide egiziana a Giza, per gentile concessione di ASI e Telespazio.

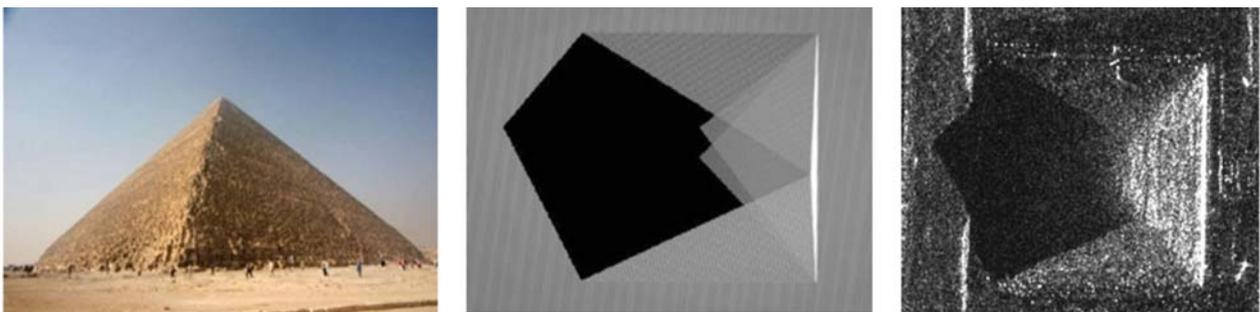


Figura 12 - Tre passaggi di rilevazione per immagini SAR.

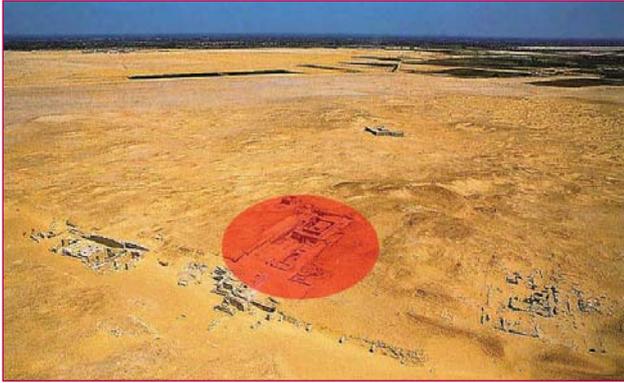


Figura 13 - Localizzazione del sito.

## CONCLUSIONI

L'applicazione illustrata, adatta alla rilevazione automatica di forme 2D utilizzando un operatore di riconoscimento di forme, è stata sviluppata per verificare la possibilità di avviare un servizio atto a soddisfare un utente finale di immagini satellitari. In particolare, l'applicazione è stata sviluppata per monitorare e individuare strutture archeologiche perdute o sconosciute in Egitto. L'approccio utilizzato prevede l'utilizzo di dati storico-cartografici per fornire informazioni sulla forma per definire automaticamente un operatore di riconoscimento di forme (*shape matched operator*) applicato alle immagini satellitari appropriate ed i risultati della rilevazione della forma sono integrati nell'ambito del GIS dell'utente finale. Una forma migliorata di questo operatore, atto all'utilizzazione di immagini ad alta risoluzione SAR, è stata definita e le prove preliminari dimostrano che la metodologia è abbastanza matura. Ulteriori ricerche e prove sono in corso, al fine di consolidare la metodologia e migliorare le prestazioni per l'automazione.



Figura 14 - Saqqara da satellite.

## RINGRAZIAMENTI

I dati per l'analisi dei siti archeologici di Saqqara e Fayoum sono stati forniti dall'architetto A. Giammarusti dell'Università di Pisa. Le immagini Cosmo SkyMed delle piramidi di Giza sono state fornite per concessione e-Geos.

## BIBLIOGRAFIA

- Moon H., Chellapa R. and Rosenfield A. (2002), *Optimal Edge-Based Shape Detection*, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 11, No. 11, November.
- Ben-Arie J. and Rao K. R. (1993), *A novel approach for template matching by nonorthogonal image expansion*, IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., Vol. 3, pp. 71-84.
- Di Iorio A., Bridgwood I., Rasmussen M., Sørensen M., Carlucci R., Bernardini F., Osman A., *Automatic detection of archaeological sites using a hybrid process of Remote Sensing, GIS techniques and a shape detection algorithm*, Proceeding of the 29° EARSel Symposium, Chania, Greece, in press.

## ABSTRACT

*Advancement in automatic monitoring and detection of archaeological sites using a hybrid process of Remote Sensing, GIS techniques and a shape detection algorithm*

The method developed in the frame of the project HORUS (Heritage Observation and Retrieval Under Sand funded by European Space Agency) for the automatic monitoring and identification of lost or undiscovered archaeological sites in Egypt has been improved and applied to the new available high resolution radar images by Cosmo Sky-Med satellites. The use of active high resolution active sensors enables continue monitoring of the target area with all whether condition (day, night with any cloudy coverage) and Cosmo Sky-Med satellites are mainly devoted to observe the "Mediterranean area" ("Med in fact is for "Mediterranean") where is the highest density of the Archaeological sites in the world. The method uses shape detection techniques on satellite imagery superposed in a GIS environment. For an area of interest, the EO data available from various satellites is pre-processed and from historical plans a shape file of the archaeological structure of interest is produced. A shape detection algorithm employing a shape matched operator is applied to the EO image to produce a detection image identifying the most probable location of the archaeological structure of interest. The shape-matched operator employed is the derivative of double exponential (DODE) operator. The final product is a GIS data set assembled as a list of required features and layers, all converted and processed in the same Geographical Reference System. The article shows the most recent advancement using an enhanced version of the operator applied to high resolution X-band SAR images by Cosmo Sky-Med.

## PAROLE CHIAVE

Monitoraggio e rilevamento del sito archeologico, GIS, telerilevamento, SAR, Cosmo Sky-Med.

## AUTORI

ALESSIO DI IORIO  
ALMA SISTEMI SAS, ROMA - ITALIA  
E-MAIL: ALMA\_SISTEMI@TISCALI.IT

RENZO CARLUCCI  
A&C2000 S.R.L. ROMA - ITALIA,  
E-MAIL: RCARLUCCI@AEC2000.EU