Uso di dati telerilevati nella caratterizzazione di un'area della regione del Fayyum (Egitto)

Gabriele Bitelli (*), Emanuele Mandanici (*)

(*) DISTART - Università di Bologna, Viale del Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italia
(gabriele.bitelli, emanuele.mandanici) @unibo.it

Riassunto
Il lavoro illustra alcuni aspetti di una ricerca in atto volta alla caratterizzazione morfologica, geologica e limnologica del lago Qarun e delle aree circostanti nella regione del Fayyum (Egitto), area di grande interesse anche per la ricerca archeologica. Vengono affrontati in particolare la valutazione di modelli digitali del terreno ottenuti da immagini satellitari e da cartografia ed alcuni aspetti legati all'analisi di dati multispettrali di sensori diversi ed acquisiti ad epoche diverse. Lo studio multitemporale, condotto anche avvalendosi della elaborazione di indici vegetazionali, può supportare un'analisi di *change detection* che metta in evidenza l'espansione delle aree agricole nel processo di bonifica in corso e le modifiche al territorio intervenute negli ultimi decenni.

Abstract
The paper presents some results derived from a research carried out on the Fayyum region (Egypt) and in particular in the area surrounding the Qarun lake, to determine its morphological and lithological setting. The region is of great interest for the archaeological research. Some aspects are discussed related to DTM evaluation, from global and local datasets, and to the analysis of multispectral satellite imagery, obtained by different sensors in different years, in order to support a change detection assessment in the area of interest.

Introduzione

Il presente studio si inserisce in un progetto di ricerca interdisciplinare volto alla caratterizzazione morfologica, geologica e limnologica del lago Qarun e delle aree circostanti, nella regione del Fayyum (Egitto), 100 km ca. a sud-ovest del Cairo, alla sinistra idrografica del Nilo. Benché caratterizzata da una estrema scarsità di precipitazioni (meno di 30 mm/anno), l'oasi del Fayyum si estende attualmente per circa 1827 km^2 ed è una delle regioni più fertili dell'Egitto, grazie alla presenza di opere idrauliche che, oggi come in passato, portano le acque del Nilo all'interno della valle attraverso il *bahr* Yussef. La parte più bassa della depressione è occupata dal lago Qarun, la cui superficie si estende oggi per 214 km^2, alla quota di -45 m s.l.m. Il suo livello è strettamente controllato dalle opere di regimazione e canalizzazione delle acque in ingresso, la gestione delle quali ha un forte impatto sia sull'uso del suolo che sulla qualità delle acque, specialmente per problemi di salinizzazione (Ghabour, Daels, 1993; Flower *et al.*, 2006; Fathi, Flower, 2005); la comprensione dei fenomeni in atto non è ancora ben definita e può giovarsi di un'analisi storica multidisciplinare che ricostruisca l'evoluzione del territorio nel tempo.
L'area è di notevole interesse anche da un punto di vista archeologico. L'Università di Bologna è da tempo impegnata in ricerche e missioni di scavo su siti di epoca greco-romana, tra cui l'importante sito di Bakchias (Bitelli *et al.*, 2002), posto sulla parte nord-orientale dell'oasi, su cui il Dipartimento di Archeologia è attivo sotto la guida del Prof. S. Pernigotti: esso si trova in un'area soggetta in questi anni a notevoli modificazioni del territorio, che possono essere ben evidenziate da un'analisi di immagini satellitari.

Lo studio della morfologia e della geologia delle aree circostanti, condotto attraverso i dati telerilevati, può essere di supporto alla ricerca archeologica, nell'intento di ricostruire l'evoluzione del territorio, con particolare attenzione alle oscillazioni del livello del lago in rapporto con l'antropizzazione.

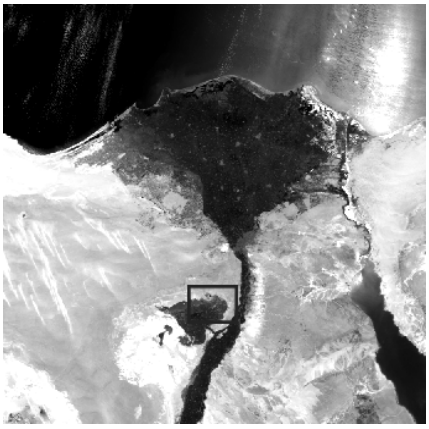


Figura 1 – Immagine MODIS con evidenziata l'area di studio.

La comprensione delle dinamiche di interazione tra uso del suolo, rete di irrigazione e qualità delle acque, cui la ricerca nel suo complesso intenderà fornire un contributo, risulta indispensabile ai fini di una corretta pianificazione territoriale, attenta all'esigenza di conciliare lo sviluppo con la preservazione delle risorse e la tutela del patrimonio culturale.

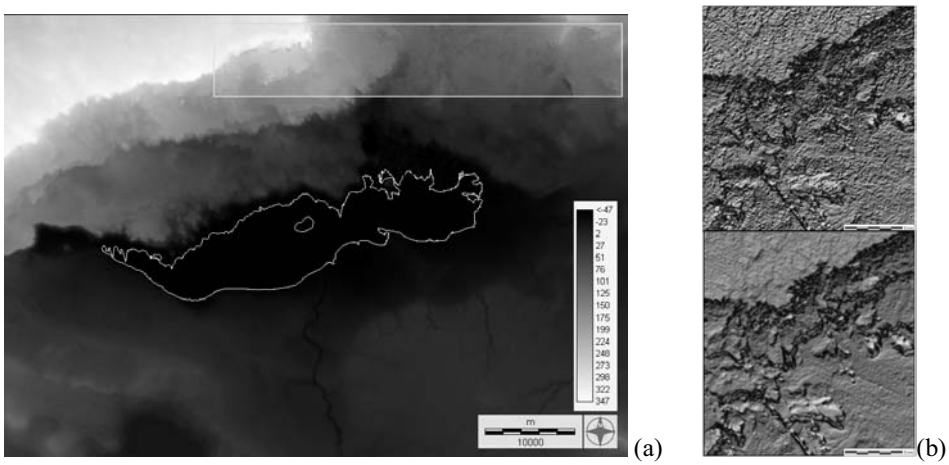
Materiali e metodi

Per l'analisi del territorio sono state acquisite diverse riprese dei satelliti Landsat, Modis ed ASTER, tali da coprire un arco temporale di tre decadi. Le immagini dell'archivio Landsat possono essere ottenute in formato GeoTiff con un livello di processamento L1T, ovvero già calibrate e geometricamente corrette attraverso la registrazione con un'immagine ortorettificata di riferimento della serie. Le immagini ASTER invece sono state ortorettificate per il presente lavoro ai fini della coregistrazione con le immagini Landsat.

Ai fini della caratterizzazione morfologica dell'area, nonché del processo di ortorettifica delle immagini ASTER, sono stati presi in considerazioni modelli numerici del terreno (DTM) di diversa origine che potessero fornire una base estesa a livello regionale. Per quanto riguarda i dati di origine satellitare sono stati valutati in particolare due prodotti di tipo globale: il DTM generato dalla missione SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), derivato da elaborazione di dati InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) e fornito con dimensione del *pixel* a terra pari a 3 secondi (Rabus *et al.*, 2003; Jarvis *et al.*, 2008), attualmente giunto alla revisione 4, ed il DTM di recente disponibilità ASTER GDEM (ERSDAC, 2009) derivante dalla mosaicatura di DTM creati da immagini stereoscopiche ASTER, con risoluzione 1 secondo, attualmente nella sua prima versione. Entrambi fanno riferimento al modello di ondulazione geoidica EGM96 e al *datum* WGS84. La figura 2a riporta il modello SRTM su un'area di circa 68 x 48 km^2 intorno al lago Qarun.

I due modelli globali sono stati confrontati tra loro e con un modello del terreno, di copertura parziale, che è stato ottenuto dalla digitalizzazione di curve di livello da cartografia in scala 1:50000, pubblicata nel 1995 dalla *Egyptian General Survey Authority* ed avente come *datum* altimetrico la determinazione del livello medio del mare "Alessandria 1906" (Bitelli *et al.*, 2009). Il confronto relativo tra SRTM e GDEM, ricampionati a 15 m, ha fornito risultati analoghi a studi precedenti condotti su DTM ASTER generati da singole immagini (Bitelli *et al.*, 2005); a titolo di

esempio per l'area rettangolare evidenziata in alto nella figura 2a la differenza fra i due dati *raster* ha un valore medio intorno a 3 m ed una deviazione standard di circa 6 m. Il modello GDEM presenta in generale una maggiore granularità ed alcune anomalie locali, che peraltro potrebbero essere rimosse in successive revisioni del database (figura 2b).



(a) (b)

Figura 2 – (a) Visualizzazione del DTM SRTM, v.4, con evidenziata a Nord un'area non coltivata usata per confronto con GDEM; (b) adottando una esagerazione di 10x nello shaded relief si può notare visivamente in un'area di dettaglio la differenza tra GDEM (in alto) e SRTM (in basso).

È interessante osservare che i dati di elevazione GDEM sono forniti insieme a corrispondenti grigliati *raster* che, per supportare una prima valutazione di qualità del dato, riportano per ogni *pixel* il numero di stereocoppie ASTER utilizzate per determinare quel valore di quota (evidentemente tale numero non può mantenersi costante in un'area a causa di differenti disturbi locali, in primo luogo determinati dalla distribuzione della copertura nuvolosa); la figura 3 riporta tale informazione per l'area test presentata. Nel confronto del dato GDEM con il DTM ottenuto da cartografia e considerato di riferimento, si è potuta osservare (Bitelli *et al.*, 2009) una buona correlazione tra la qualità del DTM di origine satellitare ed il numero di coppie usate per ottenere la quota di ciascuna cella.

Figura 3 – Numero di stereocoppie ASTER utilizzate per calcolare il valore di quota della cella nel modello numerico globale GDEM per l'area evidenziata in figura 2a.

La sperimentazione fin qui effettuata ha mostrato nel complesso una buona aderenza del modello SRTM al riferimento cartografico ed esso pertanto è stato preferito ai fini dell'ortorettifica delle immagini ASTER, anche per una maggiore uniformità con la procedura di rettifica adottata sulle immagini Landsat.
Per quanto concerne l'analisi di carattere tematico, l'area di studio è stata oggetto di una prima operazione di classificazione dal punto di vista litologico in 8 classi, ottenuta mediante un albero delle decisioni basato su indici mineralogici, che si è avvalsa di una immagine ASTER del 2007 ed

in particolare dei prodotti AST05 e AST08 (Bitelli *et al.*, 2009). I risultati hanno mostrato un buon accordo con i dati presenti in letteratura (Bown e Kraus, 1988; Swedan, 1992).
Uno studio delle variazioni territoriali intercorse nel tempo può invece essere supportato da immagini acquisite in epoche diverse, eventualmente da sensori diversi. Una prima attività in tal senso è stata eseguita operando sui valori dell'indice NDVI basato su dati di radianza al sensore. Per quanto riguarda la possibilità di comparare fra loro informazioni provenienti da sensori diversi ma con analoghe caratteristiche spettrali, il diagramma riportato in figura 4 mostra come gli istogrammi del valore dell'indice per l'area di studio, relativi ad un'immagine Landsat ETM+ e ad un'immagine ASTER acquisite lo stesso giorno a 30 minuti di distanza, si discostino di una quantità trascurabile ai fini della presente analisi preliminare.

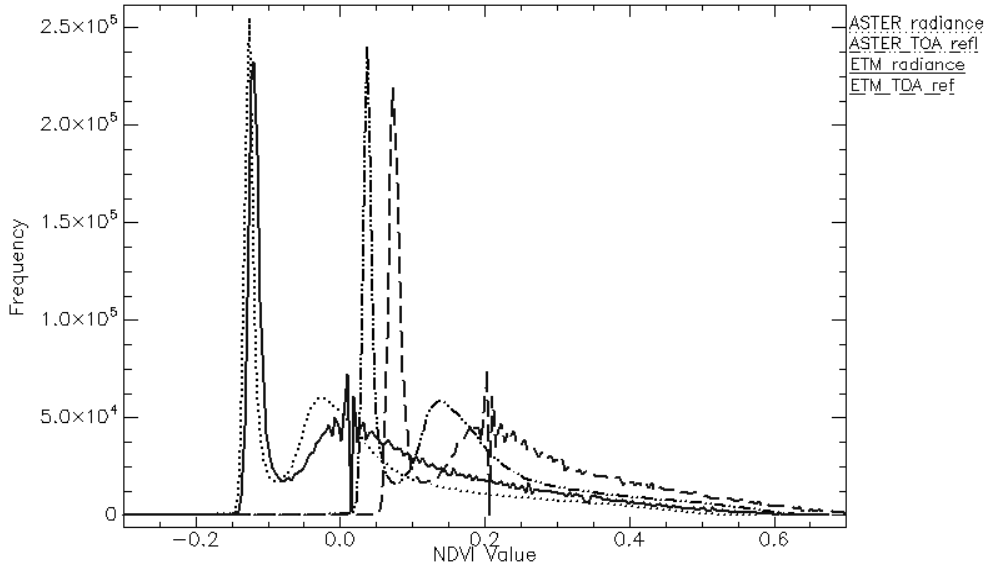


Figura 4 - Istogrammi di frequenza dei valori dell'indice NDVI calcolato su immagini di radianza e di riflettanza apparente per i sensori ETM+ ed ASTER (acquisizioni del 30/04/2002).

Il calcolo della riflettanza apparente (*Top Of Atmosphere*), sebbene da un punto di vista teorico consenta di correggere gli effetti indotti dall'angolo di elevazione solare e dall'irradianza solare (Thome *et al.*, 2001; Chander *et al.*, 2009), introduce d'altro canto un *bias* legato alle caratteristiche peculiari dei diversi sensori e non sembra pertanto opportuno qualora si debbano confrontare immagini acquisite da sistemi diversi.

***Change detection* supportata da immagini satellitari**
Per una valutazione preliminare delle opere di bonifica e della conseguente espansione dell'area coltivata realizzate nel corso degli ultimi decenni è stato calcolato l'indice NDVI su alcune immagini: in particolare in figura 5 (a-d) sono riportate le immagini relative agli anni 1973 (Landsat 1 MSS), 1988 (Landsat 4 TM), 2000 (Landsat 7 ETM+) e 2005 (ASTER). Tutte le immagini sono state riprese nel mese di ottobre, ad eccezione dell'immagine MSS che è del mese di gennaio. La coregistrazione delle immagini è stata migliorata attraverso la definizione di *tie-point*.
Ai fini della classificazione è stata stabilita una soglia sul valore dell'NDVI, sulla base dell'osservazione di istogrammi analoghi a quello di figura 4, grazie alla quale è stata discriminata l'area coltivata dalla superficie desertica. Ogni immagine è stata classificata singolarmente, per poi effettuare un confronto in post-classificazione. Sempre in figura 5 (e-f) sono riportati alcuni risultati

del confronto tra le classificazioni relative agli anni menzionati: il colore grigio indica le aree che risultano coltivate solo nell'immagine più recente e può designare le aree di espansione delle coltivazioni, viceversa il colore nero segnala le aree che risultano coltivate soltanto nell'immagine più datata e potrebbero corrispondere a campi agricoli abbandonati. Naturalmente tali risultati necessitano di un ulteriore approfondimento ed una validazione con dati di verità a terra.

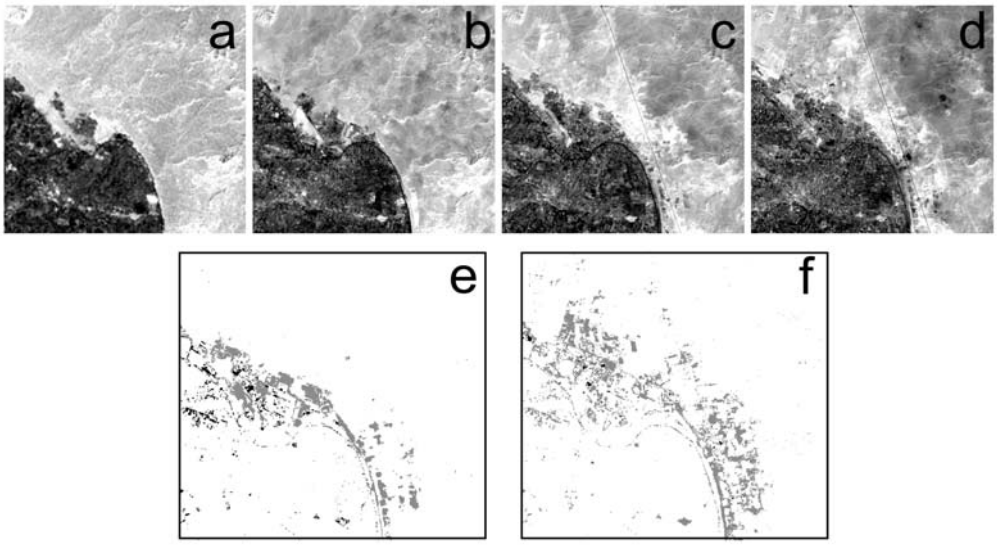


Figura 5 – L'area adiacente al sito archeologico di Bakchias nelle immagini Landsat 1 MSS 1973 (a), Landsat 4 TM 1988 (b), Landsat 7 ETM+ 2000 (c), ASTER 2005 (d); in basso l'espansione delle coltivazioni (colore grigio) ricavata confrontando i valori di NDVI nel mese di ottobre tra gli anni 1988-2000 (e), 2000-2005 (f).

Conclusioni e sviluppi futuri

L'area di studio esaminata è di grande interesse per una molteplicità di motivi, che afferiscono sia a fattori ambientali e territoriali sia all'interesse della ricerca archeologica; la letteratura scientifica relativa ad essa è tuttavia abbastanza limitata e sono molteplici gli interrogativi ancora aperti per una conoscenza approfondita della regione basata su informazioni interdisciplinari. Il lavoro presentato s'inserisce in una ricerca più ampia che potrà essere meglio finalizzata grazie ad ulteriori dati di riferimento a terra, all'uso di immagini satellitari di diversa origine, anche di tipo iperspettrale o radar, e ad elaborazioni di analisi di immagine specifiche, indirizzate a valutare particolari fattori ambientali (es. salinità, presenza di paleocanali, ecc.). Tali studi sono in corso e potranno trovare a breve una conclusione. Il caso di studio conferma in ogni caso come il telerilevamento possa affiancarsi alle altre metodologie di indagine sul territorio e fornire indicatori di grande interesse per la caratterizzazione ad ampio spettro di una regione e della sua evoluzione nel tempo.

Bibliografia

ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center), ASTER GDEM site: http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp (accessed July 2009).

Bitelli G., Capasso M., Davoli P., Pernigotti S., Vittuari L. (2003), *The Bologna and Lecce Universities Joint Archaeological Mission in Egypt: Ten Years of Excavations at Bakchias (1993-2002)*, Ed. Graus, Napoli.

Bitelli, G., Carrara, A. and Gusella, L. (2005), "Evaluation and use of DEMs derived from ASTER imagery," *Proc. Workshop Italy - Canada* "3D Digital Imaging and Modeling: Applications of Heritage Industry Medicine and Land", Padova.
Bitelli G., Curzi P.V., Mandanici E. (2009), "Morphological and lithological aspects in the north-eastern Libyan desert by remote sensing", *Proc. SPIE* 7478.
Bown T. M., Kraus M. J. (1988), "Geology and paleoenvironment of the Oligocene Jebel Qatrani formation and adjacent rocks, Fayum depression, Egypt", *U.S.G.S Professional Paper* 1452.
Chander G., Markham B. L., Helder D. L. (2009), "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors", *Remote Sensing of the Environment* 113: 893-903.
Fathi A. A., Flower R. J. (2005), "Water quality and phytoplankton communities in Lake Qarun (Egypt)", *Aquatic Sciences* 67: 350-362.
Flower, R. J., Stickley C., Rose N. L., Peglar S., Fathi A. A., Appleby P. G. (2006), "Environmental changes at the desert margin: an assesment of recent paleolimnological records in Lake Qarun, Middle Egypt", *Journal of Paleolimnology* 35: 1-24.
Ghabour T. K., Daels L. (1993), "Mapping and monitoring of soil salinity of El-Fayoum depression by the aid of Landsat imagery", *Egyptian Journal of Soil Science*, 33: 355-370.
Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E. (2008), "Hole-filled SRTM for the globe Version 4" available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database: http://srtm.csi.cgiar.org (accessed July 2009).
Rabus B., Eineder M., Roth A., Bamler R. (2003), "The Shuttle Radar Topography Mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar" *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57: 241-262.
Swedan A. H. (1992), "Stratigraphy of the Eocene sediments in the Fayum area" *Annals of the Geological Survey of Egypt* V(XVIII): 157-166.
Thome K., Biggar S., Slater P. (2001), "Effects of assumed solar spectral irradiance on intercomparisons of earth-observing sensors" *Proc. SPIE* 4540: 260-269.