IMMAGINI SATELLITARI AD ALTA RISOLUZIONE PER INDAGINI ARCHEOLOGICHE: IL CASO DI KARIMA (SUDAN)

Luigi Perotti*, Giorgio Martinotti*, Enrico Borgogno Mondino**, Marco Piras**,

(*) Università degli Studi di Torino, Dip. di Scienze della Terra, Via V.Caluso 35, 10125 Torino – luigi.perotti@unito.it
(**) Politecnico di Torino, DITAG, C.so Duca degli Abruzzi 24 – 10129 Torino
enrico.borgogno@polito.it – marco.piras@polito.it

Riassunto
Da alcuni anni la geomatica è utilizzata come supporto per diverse discipline, tra cui l'archeologia; in particolare le immagini da satellite possono essere utilizzate come supporto in progetti di studio e analisi dei siti archeologici. In questo lavoro sono state utilizzate le immagini acquisite dalle piattaforme satellitari Quickbird e Terra Aster, per la produzione di una ortofoto da sfruttare come supporto cartografico di base alla medio grande scala in un'area del Sudan (Nubia) nei pressi della città di Karima. Per la produzione dell'ortofoto satellitare è stato necessario condurre una campagna GPS per il rilievo dei necessari punti di appoggio a terra, e procedere alla generazione di un DSM a partire dall'immagine Terra Aster a disposizione. Su questa base cartografica è stato possibile sovrapporre i diversi rilievi topografici effettuati negli anni passati (strumentazione tradizionale), verificandone la congruenza geometrica e costituendo cosi la base per un Sistema Informativo idoneo alla sistematica archiviazione dei dati rilevati passati e futuri. L' ortofoto è stata inoltre utilizzata a fini dimostrativi per alcune analisi spettrali finalizzate all'identificazione di evidenze correlate alla presenza di eventuali manufatti archeologici ancora sepolti.

Abstract
In this work, we will show the results of a possible approach for the support of archeological missions, based on satellite remote sensing images. QuickBird and Aster images have been acquired in order to generate respectively an orthoimage and a Digital Surface Model (DSM) of a specific area near Karima in Nubian Sudan. A GPS survey was carried out to collect the Ground Control Points (GCP) needed for image exterior orientation during the orthoprojection process. The resulting orthoimage can be exploited for archeological site planning and more generally for the cartographic management of existing sites surveyed in traditional topographic mode. Spectral propetries of image can be used to extract further information about the presence of evidence of possible hidden archeological features.

Introduzione
Le tecniche e le metodologie della geomatica hanno trovato recentemente applicazioni nella ricerca in campo archeologico. Le numerose missioni di scavo italiane ed estere sparse in tutto il mondo possono trovare in tale ambito un valido supporto soprattutto per la generazione di cartografia di base e tematica, per la gestione dei dati all'interno di Sistemi Informativi Territoriali e per la ricostruzione di scenari tridimensionali virtuali utili all'analisi ed alla divulgazione. Il presente lavoro si riferisce agli scavi che negli ultimi decenni hanno interessato l'area del Sudan vicino alla cittadina di Karima, sulle sponde del Nilo, a circa 350 Km a nord della capitale (Khartoum). La missione per la quale è stato richiesto il supporto di questo gruppo di ricerca è condotta dall'unità di studio degli Egittologi delle Università "La Sapienza" di Roma e dell'Università di Cassino. L'obiettivo primario richiesto è stato quello di aggiornare la scarna cartografia esistente, utilizzata come base cartografica, e come strumento

di analisi per la strutturazione e la prosecuzione degli scavi, attraverso tecniche e dati della Geomatica aggiornati, controllati, economici. A tale fine è stata acquistata un'immagine Quickbird pancromatica e multispettrale da utilizzarsi per la produzione di una ortofoto dell'area di studio ad una scala sufficientemente grande.
Durante la campagna scavi 2005 è stato condotto un rilievo GPS per definire un sistema di riferimento locale, rispetto al quale determinare le coordinate dei punti di appoggio necessari all'ortoproiezione ed al calcolo dei parametri per la trasformazione dal sistema di riferimento locale (ADINDAN) a quello internazionale (WGS84). La procedura di ortoproiezione è stata condotta utilizzando il modello rigoroso disponibile all'interno del software commerciale PCI Geomatica ver. 9.1. Come dato altimetrico è stato utilizzato un DSM ibrido ottenuto in parte da un'immagine stereoscopica (ASTER) ed integrato, per la sola zona degli scavi, con un DEM prodotto dai dati di una campagna topografica tradizionale. Successivamente, l'ortofoto è stata anche utilizzata per l'identificazione di possibili indizi relativi a strutture sepolte, sfruttando le caratteristiche delle bande disponibili nell'immagine multispettrale Quickbird. In questa fase sono state utilizzate tecniche tradizionali del telerilevamento quali sintesi additive, *image enanchement*, *pan sharpening* e classificazione.

Area di Studio
Lo studio condotto riguarda in generale la zona del Jebel Barkal, situata al nord del Sudan, lungo il Nilo, tra la terza e la quarta cataratta nella regione della Nubia. L'area è pianeggiante, con una altitudine compresa tra 240 e 280 m s.l.m, con la presenza di un solo rilievo, in corrispondenza del Jebel Barkal (circa 370 m s.l.m.).
Nell'area sono attive due missioni di scavo corrispondenti ai siti di Merowe e Karima (fig.1).

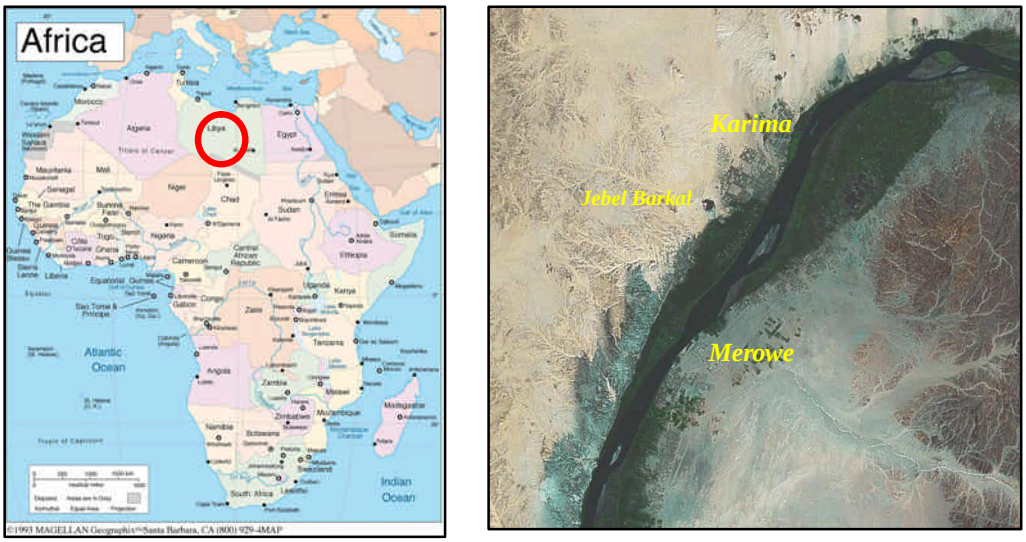

Figura 1 - In rosso l'area di studio – Nubia, Sudan : Zona di Karima e Merowe come appaiono su un'immagine Landsat a Colori Reali.

Dati disponibili

Immagine Quickbird
Per questo studio è stata utilizzata un'immagine Quickbird Ortho Ready Standard completa di una

banda pancromatica alla risoluzione geometrica nominale di 0.61 m e di quattro bande multispettrali risoluzione geometrica nominale di 2.44 m. La scelta del prodotto "Standard" è stata dettata dalla possibilità, che questo offre, di acquistare una estensione ridotta dell'intera scena corrispondente all'area di studio. L'acquisizione è stata effettuata nel mese di Settembre 2003 e la porzione di scena utilizzata presenta una dimensione di circa 8x4 km. Il prodotto Ortho Ready Standard Imagery, risulta raddrizzato geometricamente e georiferito ma non ha subito ancora la correzione delle distorsioni dovute al rilievo topografico. Le immagine Ortho Ready Standard hanno una precisione di georeferenziazione dichiarata pari a 23 m CE90%.

Immagine Terra Aster

Per l'estrazione del DSM (Digital Surface Model) necessario alle operazioni di ortoproiezione è stata utilizzata una immagine ASTER Level 1B. Tale immagine è stata scelta tra tre scene differenti disponibili in archivio NASA, in base alle migliori condizioni di copertura nuvolosa. Il sensore ASTER acquisisce immagini multispettrali, caratterizzate da una risoluzione geometrica variabile tra 15 e 90 m ed un range spettrale che varia da 0.556 a 11.32 µm. Inoltre il particolare sensore ASTER è in grado di registrare lungo la traccia orbitale immagini stereoscopiche pancromatiche (bande 3N e 3B, con una risoluzione geometrica media pari a 15 m and una lunghezza d'onda centrale di 0.804-0.807 µm) dalle quali è possibile estrarre un DSM con caratteristiche di precisione variabile tra i 5 (pianura) e i 25 m (zone accidentate) (Boccardo et al., 2004, Borgogno Mondino et al., 2044)

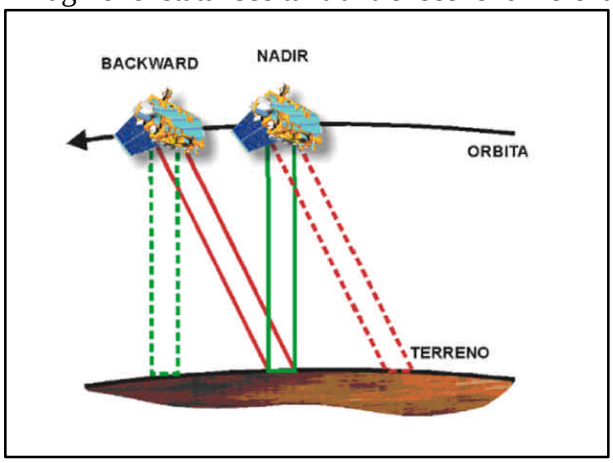

Figura 2. Acquisizione Stereoscopica ASTER

Rilievo topografico

Nel corso degli ultimi decenni, per le aree in questione sono stati prodotti numerosi elaborati cartografici ottenuti da rilievi topografici tradizionali. Per questo lavoro è stato fornito l'ultimo rilievo di dettaglio dell'area montuosa del Jebel Barkal, effettuato con stazione totale (precisioni centimetriche) durante la campagna scavi 2005 dal gruppo di lavoro guidato da Tim Kendall. Tali dati sono stati utilizzati per integrare l'informazione altimetrica del DSM Aster in corrispondenza della maggiore discontinuità presente nella zona.

Altri rilievi pregressi a carattere prevalentemente descrittivo delle strutture rinvenute (principalmente templi e palazzi dell'epoca faraonica), sono stati forniti ai fini di una loro omogeneizzazione geometrica volta a renderli congruenti e confrontabili con l'ortofoto prodotta scelta come il nuovo riferimento di base cartografico.

Campagna di misure GPS

Per poter procedere alle operazioni di ortoproiezione dell'immagine QB e all'orientamento della coppia stereoscopica ASTER, è stato necessario individuare e rilevare con adeguata precisione (pari ad almeno mezza cella QB, cioè 30 cm) un sufficiente numero di punti di appoggio (GCP, *Ground Control Points*). Tale operazione è stata effettuata con strumentazione GPS, nel corso di una campagna di misura condotta nel periodo compreso 1-17 dicembre 2005. I punti rilevati sono stati preventivamente selezionati sull'immagine QB tra i dettagli naturali o i manufatti (spigoli di edifici, muri, piccoli alberi, incroci) facilmente ed inequivocabilmente riconoscibili sia sull'immagine che sul

territorio. Per cautelarsi da qualsiasi imprevisto legato alla scarsa conoscenza del sito (inaccessibilità, scarsa copertura GPS, difficoltà nel riconoscimento del punto), è stato preventivamente individuato sull'immagine un numero di punti superiore a quelli strettamente necessari. Il rilievo GPS è stato realizzato mediante un posizionamento relativo compensato in post-processing. In questo modo, a partire da un punto di coordinate note, stimando i vettori *baseline* che collegano tale vertice a tutti i punti del rilievo sono state ottenute le triplette di coordinate (X,Y,Z) che li descrivono. Il metodo necessita:

a) di almeno due ricevitori operanti simultaneamente;
b) delle coordinate note di alcuni vertici della rete.

Nel caso specifico sono stati utilizzati due ricevitori a singola frequenza *Ashtech Promark 2*, con antenna Compact L1 con Ground Plane. La geometria della rete è stata progettata in modo da mantenere le baseline di lunghezza media di 1.5 km e massima di 7 km compatibilmente con la precisione richiesta per i punti rilevati. Questa condizione ha portato a suddividere lo schema del rilievo in due sottoreti nelle quali è presente un vertice di coordinate note. La baseline che collega i due vertici noti è l'unica con lunghezza prossima ai 7 km. Durante le fasi del rilievo un ricevitore è stato posto e mantenuto in stazione in corrispondenza del punto *fisso (base*), mentre il secondo (*rover*) è stato mosso su ciascuno dei vertici incogniti relativi al punto fisso di pertinenza e coincidenti con i GCP da rilevare. Il tempo di occupazione di ciascun punto stimato sulla base della dimensione massima delle baseline è stato di almeno 25 minuti.

Uno dei due punti fissi (collocato a Karima), è stato acquisito con una sessione continua di 24 ore al fine di effettuare un posizionamento assoluto in modalità PPP (*Precise Point Positioning*). Tale operazione consente di agganciare le coordinate dei punti rilevati ad un sistema geografico assoluto (WGS 84). Da bibliografia (Leica Geosystems, 2003) si dimostra che un'occupazione del punto di durata minima di 24 ore consecutive e continue e un processamento PPP è possibile ottenere una precisione planimetrica di 10^{-2} m. Le procedure di compensazione intese alla soluzione delle baseline della rete sono state effettuate utilizzando il software proprietario Ashtech Solution. Sono stati rilevati n. 32 punti. La precisione di posizionamento relativo dei punti è risultata essere di 0.13 m.

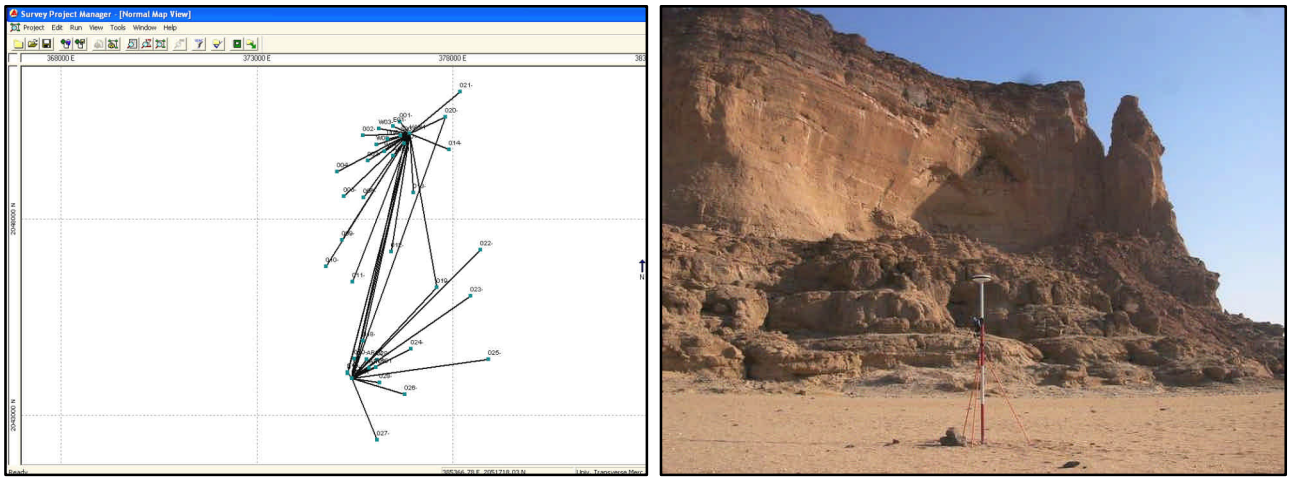

Figura 3 - Compensazione rete geodetica GPS – Esempio ricevitore GPS Ashtech modalità Rover

Produzione dell'ortofoto QuickBird

L'operazione di ortoproiezione è stata condotta utilizzando il modello rigoroso di orientamento di immagini QB disponibile all'interno del software commerciale PCI GEOMATICA Ver.9.1.

La migliore precisione planimetrica raggiungibile sulle ortofoto da satellite si ottiene infatti privilegiando l'utilizzo di modelli rigorosi di sensore rispetto a modelli generici non rigorosi (es. *RFM, Rational Function Model*). La procedura richiede la collimazione di un sufficiente numero di GCP e l'utilizzo di un Modello di Elevazione del Terreno sufficientemente accurato. Nel caso specifico sono stati collimati 26 GCP (selezionati tra i punti rilevati durante la campagna GPS) ed utilizzato il DSM prodotto per integrazione del DSM Aster (passo 15 m) e del rilievo topografico di dettaglio (passo medio di 1 m). Il DSM risultante a seguito di interpolazione Kriging dei due set di dati, presenta un passo finale di 5 m ed una precisione altimetrica media stimata di circa 5 m (anche più precisa in corrispondenza della zona del rilievo di dettaglio). A seguito di applicazione del modello per l'ortofoto rigoroso risulta un RMSE (Root Mean Square Error) relativo a 5 punti di controllo pari a 1.41 m. Tale valore rende il prodotto finale (ortofoto) confrontabile (in termini di precisione) con una cartografia a scala nominale 1:5000.

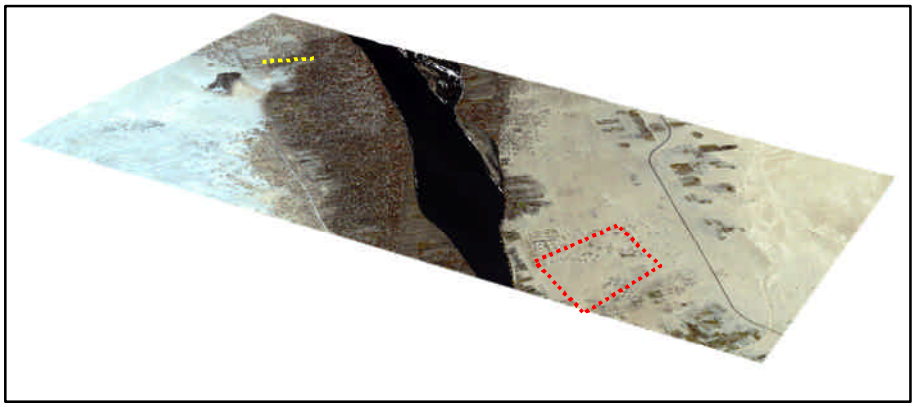

Figura 4. Ortofoto QB Colori Reali con le aree di studio

Analisi per studi archeologici

La nuova immagine ortorettificata può essere usata in maniera soddisfacente per l'analisi del terreno al fine di identificare eventuali tracce di resti archeologici. L'idea di fondo si basa sul principio che gli oggetti anomali interrati possono modificare le proprietà della superficie in termini di riflettanza. Queste anomalie possono essere registrate da un sensore ottico, in particolare estraendo informazioni a partire da bande spettrali differenti dal visibile. Utilizzando tecniche classiche di *image processing* è stato possibile individuare alcune anomalie potenzialmente riconducibili alla presenza di manufatti interrati. Procedure di *histogram stretching, density slice*, filtraggio e *pan-sharpening* sono state applicate con successo ai siti oggetto s questo lavoro, suggerendo possibili linee di intervento future agli archeologi. Alcuni esempi, riguardanti l'area di studio (Karima e il sito archeologico), sono riportati in seguito. In particolare, al fine di mantenere il livello di dettaglio delle bande multispettrali dell'acquisizione QB (risoluzione geometrica nominale di 2.44m) confrontabile con quello della corrispondente banda pancromatica (risoluzione geometrica nominale di 0.61m) si è rivelata efficace la trasformazione pan-sharpening.

Conclusioni

I risultati ottenuti e le reazioni positive espresse dai gruppi archeologici dimostrano, per l'area di studio, che le immagini satellitari possono essere usate efficacemente sia per la produzione di ortofoto da utilizzarsi come base cartografica, sia per indirizzare ricerche future sfruttandone le caratteristiche spettrali. Le precisioni planimetriche ottenute in fase di orientamento della scena QB rendono l'ortofoto ottenuta confrontabile (geometricamente) con una cartografia alla scala nominale 1:5000. L'ortofoto sarà utilizzata come base di riferimento per l'omogeneizzazione ed il recupero di congruenza geometrica dei rilievi di terreno pregressi, per la pianificazione e il controllo di quelli futuri. L'ortofoto ha rivelato anche in questo ambito le sue caratteristiche intrinseche di maggiore

leggibilità ed interpretabilità rispetto al dato cartografico tradizionale. Le immagini ASTER possono essere considerate un economico e valido strumento di lavoro per la generazione di DSM di media precisione (5-25m) in zone che non ne dispongano. Potrebbe risultare utile valutare se la media risoluzione geometrica e l'elevata risoluzione spettrale del dato possano essere utili per indagini tematiche a media scala in un contesto archeologico. Grazie alla unificazione ed omogeneizzazione dei sistemi di riferimento dei dati di terra disponbili, alla disponibilità di una base cartografica comune ed alla natura digitale dei dati prodotti, è stato possibile avviare una fase per la progettazione e realizzazione di un Sistema Informativo Territoriale utile all'archiviazione, gestione, programmazione e rappresentazione dell'intera campagna di scavo.

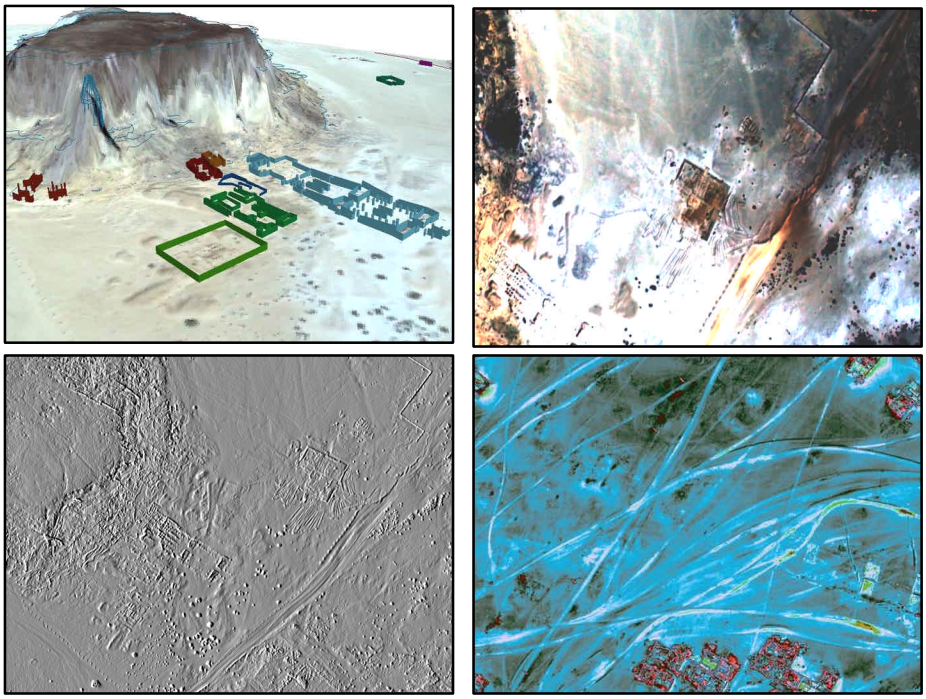

Figura 5 – Alcuni esempi di elaborazione della ortofoto satellitare QB – a) Rappresentazione 3D in ambiente GIS con la sovrapposizione del rilievo Topografico dei manufatti, b) Pan-Sharpening sulla zona del Jebel Barkal che evidenzia la presenza di anomalie, c) Esempio di filtro direzionale, d) Density slice sulla zona degli scavi di Merowe che mette in evidenza come tutta l'area sia caratterizzata dalla presenza di strutture interrate.

Sono in corso ulteriori approfondimenti relativi all'utilizzo spettrale delle scene QB e Aster per l'individuazione di anomalie significative. Queste potranno essere validate prevedendo una campagna di indagine geofisica basata su tecniche geomagnetiche e di geoRADAR.

Bibliografia

Boccardo, P., Borgogno Mondino, E., Giulio Tonolo, F., 2003, *High Resolution Satellite Images Position Accuracy Tests*, IGARSS 2003 proceedings, Toulouse

Boccardo, P., Borgogno Mondino, E., 2001, *Metric Quality Evaluation of Satellite High Resolution Images in Urban Areas*, Urban 2001 proceedings, Rome

Boccardo, P., Bellone T., Borgogno Mondino, E., Giulio Tonolo, F., Perotti L. (2004), *valutazione di dtm derivati da immagini satellitari stereoscopiche mediante software commerciali, ASITA 2004*

Borgogno Mondino E., Boccardo, P., Bellone T., Giulio Tonolo, F., (2004), *DTMs Generation from Satellite Stereo Images:Accuracy Tests in Mountain Region, SPIE 2004*

Chen K., Gao Y. (2004): "Performance Analysis of Precise Point Positioning Using Rea-Time Orbit and Clock Products" *Journal of Globa Positioning Systems*

Gao Y., Wojciechowski A. (2004): "High precision kinematic positioning using single dual-frequency GPS receiver", ISPRS Istanbul

Leica Geosystems (2003), *General Guide to Static and Rapid-Static,42 pp*