

Estrazione di batimetria da immagini del sensore WorldView2: stima dell'accuratezza e della precisione

Monica Deidda (*), Giannina Sanna (*), Gianluigi Deiana (**)

(*) Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura (DICAAR),
Piazza d'Armi, 09123 Cagliari, Tel. 0706755429-0706755437, Fax 0706755405, mdeidda@unica.it, topoca@unica.it
(**) Osservatorio astronomico di Cagliari, Loc. Poggio dei Pini, Strada 54, 09012 Capoterra (Ca),
Tel. 070711801, Fax 07071180222, deiana@oa-cagliari.inaf.it

Riassunto

Nel settore dei rilievi batimetrici, accanto alle tecniche di rilievo consolidate come quella Sonar (SOund NAvigation and Ranging), cercano di ritagliarsi uno spazio anche tecniche alternative quali quella del Telerilevamento. In tal senso la tecnologia da il suo contributo; ne è la riprova il lancio, nell'Ottobre del 2009, del sensore WorldView2 dotato di una banda appositamente deputata ad analisi batimetriche. In questo lavoro vengono esposti i risultati relativi all'impiego di immagini satellitari per l'estrazione di batimetrie nella fascia di mare da 0 a circa 25 metri di profondità. Lo studio, preceduto da altre sperimentazioni effettuate dagli stessi autori, ha riguardato l'applicazione del modello di Jupp di estrazione di batimetrie ad immagini del sensore Worldview2 per il quale sono state acquisite una scena nel 2010 ed una ripresa stereoscopica nel 2011, entrambe relative alla spiaggia del Poetto nel litorale di Cagliari. Le immagini sono state sottoposte a pretrattamento per la classificazione del fondale e l'estrazione delle aree omogenee relative alla sabbia, unica classe a cui è stato applicato il modello. Sia la calibrazione del modello di attenuazione che la successiva validazione impongono un'accurata conoscenza dei valori di profondità. Perciò è stato necessario ricorrere a rilevamenti puntuali della profondità distribuiti su un'area sufficientemente ampia, misurata in aree nelle quali la dinamica costiera era sufficientemente lenta da rendere trascurabili le differenze di profondità dovute alle variazioni stagionali del fondo marino. Trattandosi di rilevamenti prossimi alla linea di riva non è stato possibile operare con imbarcazioni a motore. Perciò nella fascia da 0 a 1.5 m di profondità si è proceduto con un rilevamento topografico classico, mentre per la fascia da 1.5 a 25 m è stata realizzata una piccola imbarcazione dotata di ecoscandaglio a basso costo e ricevitore GPS. Se da un lato il confronto con le misure in situ ha permesso valutazioni circa l'accuratezza del metodo, l'applicazione del modello alle immagini stereoscopiche ci ha permesso di valutare, praticamente per lo stesso istante, il valore di profondità ottenuto da due immagini diverse, consentendo per la prima volta una stima della precisione del metodo.

Abstract

In the field of bathymetric surveys, among well-established techniques such as SONAR (Sound Navigation And Ranging), new ones are emerging, such as Remote Sensing. New technologies are contributing to this, such as the launch in October 2009 of the WorldView2 sensor, with a band expressly dedicated to bathymetric analysis. This work expounds the results obtained using satellite imagery for extracting bathymetric data in the 0-25 m depth range. The research, which follows on previous experiments by the same authors, concerns applying the Jupp model for bathymetry extraction to WorldView2 imagery, in particular a 2010 scene and a 2011 stereoscopic scene, both centered on the Poetto beach in Cagliari, Italy. The images were pre-processed in order to classify the bottom types, extracting the homogeneous areas corresponding to a sand bottom, the only class to which the model was applied. Both the calibration of the attenuation model and the successive validation require an accurate knowledge of the actual depth values; for this reason, it was

necessary to survey the depths in a wide area, while choosing zones where the coastal dynamics were slow enough not to produce significant seasonal variations in the depth values. Being very close to the coast, it was not possible to use a motorboat for the survey: for the first zone (depths between 0 and 1.5 m) a traditional GPS survey was used, while the 1.5 - 25 m zone was surveyed using a small boat equipped with an echo sounder and a GPS receiver. On one hand, the comparison with the surveyed depth values allowed us to evaluate the accuracy of the method; on the other, the use of the stereoscopic pair gave us an evaluation of the differences in the depth values extracted from two near-simultaneous images of the same area, and thus, for the first time, an estimation of the method's precision.

Introduzione

Dal 1984, data del lancio del satellite statunitense Landsat 5 con cui sono state eseguite le prime mappature di batimetria da immagini satellitari, la tecnologia ha fatto passi da giganti. L'avvento, nell'ultimo decennio, dei sensori ad alta risoluzione come Ikonos e Quickbird hanno permesso analisi sempre più accurate. La tecnica di estrazione delle batimetrie da immagini satellitari si sta consolidando così tanto che il satellite WorldView2 è stato progettato con una banda a questo dedicata e chiamata "Coastal".

Fin'ora però non è stato possibile valutare la precisione del metodo ma solo dare una stima dell'accuratezza raggiungibile ottenuta confrontando i modelli digitali estratti dalle immagini con rilievi batimetrici diretti. Un metodo per ottenere valori di precisione è quello di confrontare immagini indipendenti acquisite nello stesso istante. Il fatto che WorldView2 consente prese stereoscopiche in cui le singole scene sono acquisite con un piccolo intervallo temporale rende possibile eseguire valutazioni sulla precisione dei valori da questa estratti.

Per gli scopi della presente ricerca è stata fissata, quale area test, quella del litorale del Poetto. Situato a sud della Sardegna (Italy), il Poetto è il litorale della città di Cagliari. La sua particolare posizione geografica ha senza ombra di dubbio condizionato la sua storia. Esso è infatti da sempre caratterizzato da fenomeni erosivi, principalmente dovuti a cause di tipo antropico, e per questo nel 2002 è stato sottoposto a ripascimento con sabbia prelevata a mare.

L'analisi è stata condotta confrontando i valori di profondità estratti in ogni scena per differenti calibrazioni, tra scene diverse e con il rilievo batimetrico diretto. In ciascuna scena sono state individuate 10 distinte aree di 50x50 pixel rappresentative delle acque profonde con le quali si è calibrato il modello. La distribuzione delle aree di calibrazione nelle due diverse scene è rappresentata in Figura 1 e 2. Nel seguito vengono descritte le caratteristiche principali delle due scene, il metodo applicato e i risultati ottenuti. Per semplicità le due immagini sono state rinominate in funzione dell'istante di acquisizione in 5318 la prima e 5419 la seconda.



Figura 1. Aree di calibrazione nella scena 5318.

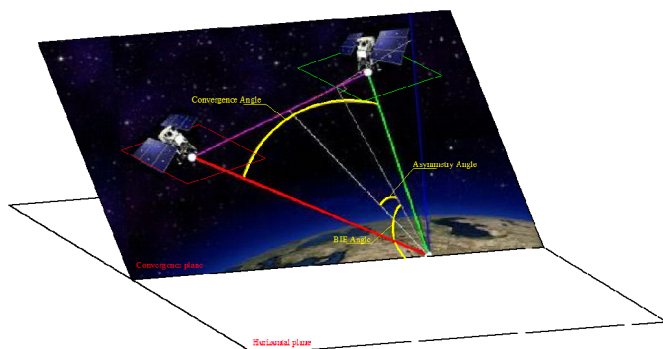


Figura 2. Aree di calibrazione nella scena 5419.

Configurazione della stereo coppia

La geometria della coppia stereoscopica è stata ricostruita grazie al file con estensione .STE a corredo delle immagini. In tale file la geometria convergente delle immagini stereo è descritta mediante tre misure angolari: l'angolo di convergenza, l'angolo di asimmetria e il bisector elevation angle (BIE). Essi misurano le relazioni geometriche tra due raggi che intersecano un punto a terra comune alle due immagini, per questo detti raggi omologhi. Due raggi omologhi definiscono un piano chiamato piano di convergenza (ISD 2011).

Più in particolare l'angolo di convergenza è l'angolo che due raggi omologhi formano sul piano di convergenza, l'angolo di asimmetria quello tra la proiezione sul piano di convergenza della verticale sul punto a terra e la bisettrice dell'angolo di convergenza, infine il BIE è l'angolo tra la bisettrice e la proiezione di questa sul piano orizzontale (Figura 3). Il più importante tra i tre angoli è l'angolo di convergenza il cui valore ideale varia tra i 30 e i 60 gradi. E' importante effettuare



un'acquisizione asimmetrica, in quanto questa consente di discernere con maggiore accuratezza le caratteristiche a terra, ma l'angolo deve essere mantenuto sotto i 20 gradi. L'angolo BIE definisce la quantità di parallasse che apparirà nella direzione verticale dopo l'allineamento. Per tale motivo esso dovrebbe essere compreso tra i 60 e i 90 gradi.

Figura 3. Geometria della stereo coppia.

Il 17 Giugno 2011 è stata acquisita sull'area di studio una coppia di immagini stereo del sensore WorldView2 di livello 1B. L'area coperta dalle immagini è di circa 100 Km² e va da 9° 3' 30,23'' a 9° 17' 57,23'' di longitudine e da 39° 17' 57,23'' a 39° 08' 11'' di latitudine. Le caratteristiche delle due immagini, acquisite entrambe con la posizione del sensore in forward, sono riassunte nella Tabella 1.

Parametri	Immagine 5318	Immagine 5419
Data di acquisizione	17 Giugno 2011	17 Giugno 2011
Ora	10:53:18	10:54:19
Angolo zenitale della vista	57.1	61.7
Angolo azimutale della vista	325.6	264.5
Dimensione pixel	2.394	2.220
Angolo zenitale del sole	73.1	73.2
Angolo azimutale del sole	155.0	155.8
Bits per pixel	16	16

Tabella 1. Caratteristiche della stereo coppia WorldView2.

I tre angoli che definiscono la geometria della stereo coppia utilizzata sono riassunti nella tabella 2 seguente:

Angoli	Stereo coppia 5318 5419
Convergenza (inizio - fine)	30.25 - 30.25
Asimmetria (inizio - fine)	5.09 - 5.59
BIE (inizio - fine)	63.14 - 62.67

Tabella 2. Angoli della stereo coppia.

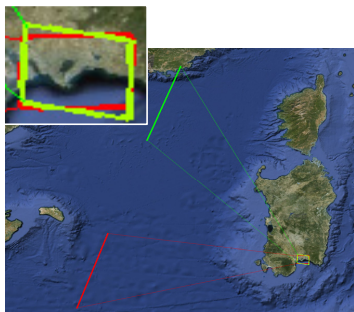


Figura 4. Traccia dell'orbita a terra.

La configurazione della geometria della presa risulta quindi appena sopra i limiti descritti sia per quanto concerne l'angolo di convergenza che per il BIE mentre risulta accettabile per il solo valore di asimmetria. La stereo coppia presenta inoltre una sovrapposizione del 96.3%.

Il file con estensione .EPH, anch'esso fornito a corredo delle immagini, contiene le coordinate geocentriche dei punti dell'orbita e le relative accuratze valutate ad intervalli di tempo regolari pari a 0,2 secondi. La figura 4 mostra le tracce a terra così come ricostruite da questo file.

La configurazione appena descritta ha prodotto due immagini di qualità non equivalente; se infatti l'immagine 5419 può ritenersi "radiometricamente" adatta agli scopi della presente trattazione, altrettanto non può dirsi per quella 5318. Quest'ultima infatti è stata presa nelle condizioni peggiori per l'impiego in batimetria, perciò si può quasi ritenere che si tratti del 'worst case scenario'.

Determinazione della batimetria

Per l'estrazione della batimetria è stato utilizzato il metodo di Jupp così come descritto in Green et al. (2000). L'algoritmo è stato implementato in linguaggio IDL (*Interactive Data Language*) e integrato nel menù del software ENVI. L'immagine 5419 è stata pre-processata in accordo alla procedura descritta in Deidda et al. (2012). Questa procedura divide l'immagine in classi, ognuna corrispondente a una tipologia di fondale omogeneo. Tra le classi così identificate è stata selezionata quella corrispondente al fondale di tipo sabbioso, rappresentata in ENVI come ROI (*Region of Interest*). Applicando una trasformazione di coordinate l'area corrispondente alla sabbia è stata portata dall'immagine 5419 a quella 5318. Operando in tal modo si è perseguito un duplice obiettivo: evitare alterazioni dei valori di radianza dei pixel conseguenti ad operazioni di georeferenziazione, avere la garanzia che il risultato della classificazione sulle due immagini (vista la quasi contemporaneità dell'acquisizione) sia esattamente la stessa. Per la calibrazione del modello è necessario un rilievo batimetrico diretto. La prima fascia fino alla profondità di circa -1.50 m. è stata rilevata da due operatori con strumentazione GPS in modalità NRTK. Due operatori hanno percorso a piedi 30 transetti ortogonali la linea di riva e distanti 20 metri l'uno dall'altro. Ancora con tecnica GPS è stata misurata, per tutta la durata del rilievo, la posizione del pelo libero dell'acqua. Con 46762 epoche disponibili (dalle ore 10:00:00 alle ore 22:59:59 del giorno di rilievo) misurate dalla stazione permanente GCAG (rete Sarnet) è stata calcolata una VRS (Virtual Reference Station) in funzione della quale è stato post processato il rilievo. Allo scopo di determinare la quota del livello del mare in corrispondenza all'esatta posizione planimetrica dei punti del rilievo è stata calcolata con un interpolatore lineare la curva di *fitting*, la cui equazione è $y = 8.627 \cdot 10^{-6} x + 41.42$ essendo x il tempo GPS e y la quota del pelo libero dell'acqua (figura 5).

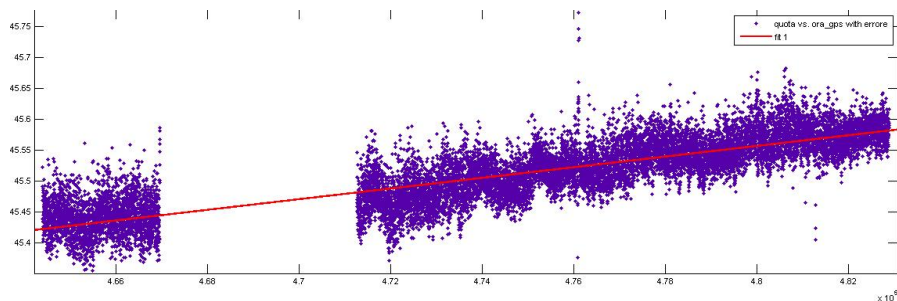


Figura 5. Curva di interpolazione dei punti di rilievo della marea.

La profondità in ciascun punto del rilievo è quindi ottenuta come differenza tra la quota del fondale e quella del pelo. Considerato però che il range di variazione delle quote del livello del mare nella giornata di rilievo è stato pari a 13.40 cm, e valutata la σ si è scelto di calcolare il valore di profondità utilizzando come quota del pelo libero il valore medio pari a 45.515. Per il rilievo della seconda fascia, in considerazione dei limiti alla navigazione a motore fino a 300 metri dalla riva, occorre utilizzare una piccola imbarcazione da trascinare a remi. Nell'intento di minimizzare però gli errori di rollio e beccheggio dovuti alla presenza a bordo degli operatori, si è scelto di montare la strumentazione su un piccolo natante progettato e realizzato ad hoc. La scelta, per ovvie ragioni di



Figura 6. Unopuntozero.

stabilità, è ricaduta sulla simulazione di un piccolo catamarano denominato "unopuntozero". Lungo circa 1 metro e largo circa 80 cm, possiede una struttura (realizzata piegando tubi in acciaio della sezione 10x10 cm) nel cui baricentro è situata un'asta regolabile in altezza. Alle due estremità dell'asta sono montati in cima l'antenna GPS per il rilievo della posizione planimetrica, al piede un trasduttore per il rilievo delle profondità. Due parabordi per grosse imbarcazioni realizzano la struttura galleggiante (Figura 6).

Dotato del solo sensore di profondità, il trasduttore è capace di fornire valori fino a -150 m, più che sufficienti a soddisfare le esigenze della presente ricerca e a realizzare rilievi di bassi fondali a ridosso della linea di costa. Allo scopo di assicurare la corrispondenza delle letture del GPS e di quelle dell'ecoscandaglio è stato scritto un software in linguaggio Python che sincronizza i messaggi NMEA dei due dispositivi. La realizzazione del rilievo della seconda fascia, oltre -1.50 m, costituisce una delle fasi per il proseguo della presente ricerca. La figura 7 mostra il rilievo di prova eseguito con "Unopuntozero" allo scopo di testare la strumentazione.



Figura 7. Rilievo di test con Unopuntozero.

Il modello di Jupp è stato applicato in ciascuna delle due immagini 10 volte (una per ogni area di calibrazione individuata). Non tutte le aree di calibrazione sono risultate però valide ai fini



Figura 8. Rilievo GPS e DSBM.

dell'estrazione dei valori di profondità e pertanto sono state scartate. In particolare per quanto concerne l'immagine 5419 sono state scartate l'area di calibrazione 1 in quanto produceva valori estrapolati e non interpolati e le aree 4, 5, 8 il numero dei valori di profondità estratti risultava irrisorio. Per il medesimo motivo sono state scartate nell'immagine 5318 le aree 2, 5 e 9. Le aree 6 e 10 non sono state utilizzate invece in quanto definiscono DOP che non si intersecano con il rilievo NRTK. Questo è stato infatti eseguito solo in una piccola porzione del litorale.

In figura 8 è possibile vedere in rosso la localizzazione di quest'ultimo e in verde quella dei valori estratti dall'immagine 5419 (caso dell'area di calibrazione 7). Allo scopo di distinguere il modello di profondità ottenuto con il rilievo diretto da quello derivante dall'applicazione del modello di Jupp per ogni singola area di calibrazione, nel seguito quest'ultimo sarà chiamato DSBM (Digital Sea Bottom Model).

Analisi dei risultati

Come già detto il confronto ha riguardato la fascia da 0 a 1.5 metri di profondità. Il software di estrazione della batimetria ha prodotto 6 modelli del fondo per l'immagine 5419 e 7 per 5318, ciascuno corrispondente ad una differente area di calibrazione (figure 1 e 2). Un confronto diretto tra i modelli non è possibile dato che, come risultato della calibrazione stessa, le aree in cui viene stimata la profondità non sono esattamente le stesse (differenti DOP). La strategia di confronto è stata quindi quella di intersecare spazialmente i modelli e limitare il confronto alle aree comuni. Anche il confronto con il rilievo NRTK del fondo, che ha preceduto quello fra i DSBM, ha necessitato di una strategia di accoppiamento dei punti. In questo caso la comparazione è stata effettuata confrontando la profondità rilevata con quella estratta dall'immagine per il punto più vicino fino ad una distanza massima di mezzo pixel (1.2 m a terra).

La tabella 3 seguente mostra le medie e le deviazioni standard degli scarti tra i punti del DSBM e quelli del rilievo NRTK per le aree di calibrazione dell'immagine 5419.

Area di calibrazione	Media (m)	Deviazione Standard (m)
2	0.25	0.21
3	0.30	0.20
6	0.21	0.20
7	0.21	0.19
9	0.39	0.22
10	0.46	0.26

Tabella 3. DSBM estratto dalla 5419 vs Rilievo NRTK.

Le aree di calibrazione 9 e 10 sono state scartate perché le medie delle differenze sono troppo elevate.

Aree di calibrazione	Differenze (m) <									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
2-3	35%	46%	49%	51%	54 %	58%	64%	72%	81%	92%
2-6	38%	51%	56%	58%	61 %	64%	69%	75%	83%	93%
2-7	68%	89%	96%	98%	99%	99%	99%	99%	99%	100%
3-6	62%	86%	95%	98%	99%	100%	100%	100%	100%	100%
3-7	75%	94%	98%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
6-7	86%	97%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabella 4. Percentuali delle differenze, tra le diverse aree di calibrazione della 5419 rimaste, con valori inferiori alle soglie indicate in tabella.

L'area di calibrazione 2 mostra un bassissimo accordo, inferiore al 50% alla soglia dei 20 cm con le altre, perciò è stata scartata.

Le aree di calibrazione 3, 6 e 7 sono quelle che mostrano il maggiore accordo con il rilievo NRTK, e coerenza interna. Sono perciò da considerare validi ed equivalenti i DSBM provenienti da tutte e tre.

In maniera analoga sono state trattate le diverse aree di calibrazione per l'immagine 5318. La tabella 5 seguente mostra, alla stregua di quanto fatto per l'immagine 5419, le medie e le deviazioni standard degli scarti tra i punti del DSBM estratto per le aree di calibrazione dall'immagine 5318 e quelli del rilievo NRTK.

Area di calibrazione	Media (m)	Deviazione standard (m)
1	0.25	0.21
3	0.30	0.20
4	0.21	0.20
7	0.39	0.22
8	0.21	0.19

Tabella 5. DSBM estratto dalla 5318 vs Rilievo NRTK.

Con la stessa motivazione adotta per le aree di calibrazione 9 e 10 dell'immagine 5419, è stata scartata l'area di calibrazione 7.

Il confronto tra i DSBM rimasti è svolto analogamente a quello della immagine 5419. I risultati sono riportati nella tabella 6 seguente:

Aree di calibrazione	Difference (m) <									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1-3	22%	56%	79%	91%	94%	96%	98%	99%	99%	22%
1-4	23%	51%	80%	94%	98%	99%	100%	100%	100%	23%
1-8	38%	71%	88%	94%	97%	99%	99%	100%	100%	38%
3-4	51%	82%	92%	96%	98%	99%	99%	100%	100%	51%
3-8	44%	79%	90%	94%	96%	98%	98%	99%	100%	44%
4-8	40%	69%	87%	95%	98%	99%	100%	100%	100%	40%

Tabella 6. Percentuali delle differenze, tra le diverse aree di calibrazione della 5318 rimaste, con valori inferiori alle soglie indicate in tabella.

Tutte le aree di calibrazione mostrano, alla soglia dei 20 cm, coerenza interna. Sono da considerare validi ed equivalenti i DSBM provenienti da tutte. Infine con la stessa metodologia sono stati confrontati tutti i DSBM rimasti della 5419 con quelli della 5318.

Aree di calibrazione	Differenze (m) <									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
3-1	9%	24%	37%	46%	53%	60%	65%	71%	77%	85%
3-3	21%	37%	47%	54%	61%	66%	73%	80%	88%	94%
3-4	21%	37%	47%	55%	60%	66%	73%	81%	89%	95%
3-8	15%	31%	42%	50%	57%	64%	70%	76%	84%	93%
6-1	2%	4%	14%	30%	41%	50%	58%	65%	72%	83%
6-3	10%	23%	36%	46%	54%	61%	69%	78%	87%	93%
6-4	13%	25%	36%	45%	53%	60%	68%	78%	87%	95%
6-8	6%	14%	26%	38%	48%	55%	63%	71%	81%	91%
7-1	2%	5%	18%	38%	52%	62%	69%	75%	80%	90%
7-3	14%	31%	46%	59%	68%	75%	80%	87%	94%	97%
7-4	18%	34%	47%	57%	66%	72%	79%	86%	93%	98%
7-8	9%	20%	35%	50%	61%	69%	75%	80%	86%	94%

Tabella 7. Percentuali delle differenze, tra le diverse aree di calibrazione della 5419 rimaste e quelle della 5318, con valori inferiori alle soglie indicate in tabella.

La tabella mostra che non si hanno percentuali di accordo superiori al 50% al di sotto di **0.6 m**, che pare quindi il limite di precisione del metodo.

Conclusioni

Sulla base dei confronti fin qui effettuati possiamo dire che malgrado le immagini fossero notevolmente differenti per geometria e qualità, mostrano un accordo che ci consente di dire che la precisione con cui si può stimare le profondità è di circa 60 cm. Questo risultato, di prima approssimazione ci consentirà di progettare i parametri di qualità dei rilievi batimetrici necessari per calibrare il modello. Nell'immediato futuro infatti abbiamo previsto, con l'ausilio di *Unopuntozero*, un rilevamento batimetrico di una zona più ampia comprendendo profondità che ci consentiranno di creare le DOP anche per le altre bande del sensore e soprattutto per la coastal.

Bibliografia

Deidda M., Sanna G. 2012. Pre-processing of high resolution satellite images for sea bottom. Italian Journal of Remote Sensing, 44(1), pp. 83-95

Digital Globe. Imagery Support Data (ISD) Documentation. Supplemental information for the product guide http://www.digitalglobe.com/downloads/Imagery_Support_Data_Documentation.pdf (11 Jan. 2011).

E. P. Green et al., Remote Sensing for Tropical Coastal Management, Parigi, UNESCO, 2000

Jupp, D.L.B., 1988, Background and extensions to depth of penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters. Proceedings of the Symposium on Remote Sensing of the Coastal Zone, Gold Coast, Queensland, September 1988, IV.2.1-IV.2.19