

ORTORETTIFICA DI IMMAGINI SATELLITARI IKONOS DELLA COSTA DEL MOLISE ATTRAVERSO IL MODELLO DLT

E. Bertacchini^a, A. Capra^a, M. Dubbini^a, F. Immordino^b

^aDIMEc – Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Via Vignolese 905, 41100 Modena, Italia - eleonora.bertacchini@unimore.it

^bENEA - Ente per le Nuove Tecnologie e l'Ambiente, Protezione del Territorio e dell'Ambiente - Prevenzione e Mitigazione Rischi Naturali, Via Martiri di Monte Sole, 4, 41180 Bologna, Italia - immo@bologna.enea.it

KEY WORDS: Telerilevamento, ortorettifica, IKONOS, GCP, GPS, DLT

RIASSUNTO

L'ortorettifica di immagini satellitari IKONOS ad alta risoluzione è una procedura di elaborazione che presenta grandi potenzialità e tra le diverse applicazioni, possono anche essere utilizzate a scopo di aggiornamento cartografico e per la produzione di nuova cartografia a media e piccola scala, in alternativa alle tradizionali tecniche di fotogrammetria aerea. L'utilizzo delle immagini satellitari a scopo cartografico è vantaggioso anche in termini economici; il loro costo risulta essere inferiore rispetto al progetto, all'esecuzione e alla restituzione di un classico volo fotogrammetrico. Inoltre, è possibile adottarle come strumento di monitoraggio del territorio quando l'entità del fenomeno da monitorare è superiore alla risoluzione del metodo.

La presente ricerca riguarda l'ortorettifica di immagini IKONOS pancromatiche (risoluzione pari ad 1 m) della costa del Molise attraverso il modello matematico DLT (*Direct Linear Transformation*) e l'utilizzo di GCP (*Ground Control Point*) rilevati con tecnica GPS (*Global Positioning System*) e DTM (*Digital Terrain Model*) con risoluzione di 20 m e 40 m, forniti dalla Regione Molise. Il lavoro rientra nell'ambito del Progetto NOE – “Progetto NOE Patrimonio e prevenzione dai rischi naturali”, progetto interregionale a cui collaborano diversi enti, tra cui la Regione Molise e l'ENEA (*Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente*). L'obiettivo è quello di verificare il risultato del processo di ortorettifica dell'immagine elaborata attraverso il modello DLT, in funzione del numero di GCP adottati, anche durante la fase di istruzione del modello e dei DTM. L'accuratezza dei risultati conseguiti è dell'ordine di 2-3 m, sia in planimetria che in altimetria. Pertanto, le immagini si prestano alla costruzione e/o all'aggiornamento di mappe a media scala.

ABSTRACT

Orthorectified IKONOS satellite imagery has a wide range of applications. Orthorectified satellite images can be used to create new cartography or to update existing imagery instead of traditional photogrammetry, and are a useful tool for territory monitoring. In addition, the use of satellite imagery is more affordable than photogrammetry: given satellite images cost less than aerial photographs and do not require a photogrammetric flight.

Orthorectification of high resolution IKONOS satellite images of Molise's coast, using GCP (*Ground Control Points*) collected through GPS (*Global Positioning System*) surveying, mathematical model DLT (*Direct Linear Transformation*) and DTM (*Digital Terrain Model*) with 20 m and 40 m resolution is discussed. Results of the orthorectification of IKONOS satellite imagery utilizing different configurations of GCP and DTM are evaluated, and results show a similar vertical and horizontal accuracy of approximately 2-3 m. These results suggest the orthorectified satellite images are sufficient for updating existing cartography and for generating relatively small scale new maps. This study is part of the collaborative European project Progetto NOE – “Progetto NOE Patrimonio e prevenzione dai rischi naturali”, involving many organizations, including the ENEA (*Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente*) and the Regional Administration.

INTRODUZIONE

Le immagini satellitari ad alta risoluzione, commercializzate da pochi anni, costituiscono un'importante innovazione nell'ambito della fotogrammetria digitale. Le immagini, acquisite da piattaforma satellitare, devono essere geometricamente corrette e georeferenziate prima di essere utilizzate.

L'ortorettifica di immagini satellitari ad alta risoluzione, è una procedura di elaborazione delle immagini che attualmente ha delle grandi potenzialità. Le immagini ortorettificate possono essere utilizzate in sistemi GIS (*Geographic Information System*), per aggiornare la cartografia esistente o per costruirne nuova a media e grande scala (da 1:10.000 a 1:5.000), eventualmente in alternativa alle tecniche tradizionali della fotogrammetria da foto aeree ed anche per il monitoraggio del territorio (Crespi M. et al., 2003). L'utilizzo delle immagini satellitari è vantaggioso in termini economici essendo meno costoso acquistare immagini da satellite per la produzione di mappe, piuttosto che progettare ed eseguire appositamente un volo. Inoltre, le serie di immagini di una zona possono essere disponibili in breve tempo grazie al periodo di rivisitazione del satellite e questo è un vantaggio nella gestione delle emergenze ambientali (Dominaci D. et al., 2006).

La Regione Molise, aderendo al progetto interregionale finanziato dalla Comunità Europea per il monitoraggio della linea di costa attraverso il Progetto NOE – “Progetto NOE Patrimonio e prevenzione dai rischi naturali”, ha ritenuto conveniente monitorare il territorio costiero con immagini satellitari IKONOS (risoluzione spaziale pari a 1 m nel pancromatico e pari a 4 m nel multispettrale) e sistemi di posizionamento GPS. L'Amministrazione regionale ha deciso di utilizzare immagini satellitari georeferenziate, ma da ortorettificare, coinvolgendo anche enti esterni come l'ENEA per la loro elaborazione. L'obiettivo del progetto è quello di monitorare periodicamente lo stato della costa per poterne contenere il degrado e per valutare l'efficacia degli interventi di tutela messi in atto, con un dispendio di risorse ridotto. Per poter analizzare lo stato della linea di costa con cadenza annuale, le tecniche tradizionali di fotogrammetria e di rilievo topografico sarebbero sicuramente adeguate per potenzialità di utilizzo e precisione, integrabili con rilievi GPS cinematici.

La possibilità di utilizzare le immagini satellitari ad alta risoluzione a scopo cartografico dipende da diversi fattori: caratteristiche geometriche e radiometriche del sensore, tipologia di prodotti forniti dalla compagnia che gestisce il satellite, dati che si hanno a disposizione e software necessari per l'elaborazione e il trattamento delle informazioni (Baiocchi V. et al., 2006).

Attraverso l'utilizzo di dati non precedentemente elaborati è possibile controllare ogni step del processo di ortorettifica (Toutin T., 2004) e stabilire quale sia la fase critica su cui intervenire per ottimizzare il procedimento. L'obiettivo è quello di individuare una procedura standard di elaborazione, proficua in termini economici e di tempo, adeguata alle specifiche del progetto, che consenta di raggiungere l'accuratezza necessaria per lo studio del degrado costiero.

Attualmente l'ortorettifica delle immagini IKONOS può essere eseguita attraverso due modelli: il modello rigoroso di Toutin e il RFM (*Rational Function Model*) (Baiocchi V. et al., 2006; Dial G. et al., 2003). Per questo studio si è deciso di utilizzare il modello DLT, caso particolare delle funzioni razionali, e di verificarne l'attendibilità in funzione del numero e della configurazione di GCP ed anche della risoluzione spaziale del DTM. Questa trasformazione, tipica della fotogrammetria classica, consente di identificare i parametri del modello matematico utilizzando solamente i GCP. Quindi non è indispensabile avere a disposizione i metadati dell'immagine (RPC- *Rational Polynomial Coefficient*) che forniscono le informazioni relative al volo, utilizzate nel modello rigoroso di Toutin o con le RFM, ma fruibili solo se l'immagine viene utilizzata nel sistema di riferimento cartografico e nel datum in cui è stata georeferita.

1. DATA SET

1.1. Immagini IKONOS

La costa del Molise è stata acquisita con il satellite IKONOS in quattro scene dalle dimensioni di 11,3 km x 11,3 km ciascuna. Per poter individuare la miglior procedura di ortorettifica è stata scelta, per iniziare l'analisi, un'immagine acquisita in modalità pancromatica che fosse rappresentativa della morfologia media della costa. Il territorio è articolato e vario: alle zone di costa bassa si alternano aree collinari dell'entroterra, caratterizzate da brusche variazioni di quota dovute alla presenza di numerosi corsi d'acqua di piccola portata che hanno scavato strette valli. L'area indagata si sviluppa lungo una fascia costiera di circa 13 km di lunghezza a Nord di Termoli, tra i fiumi Trigno e Biferno e si estende verso l'interno per circa 4-5 km. Il territorio, prevalentemente agricolo, ha subito una consistente modificazione nelle aree limitrofe alla costa, a causa dello sviluppo turistico che ha coinvolto la Regione nell'ultimo decennio. Le immagini IKONOS possono essere acquistate a diversi livelli di elaborazione e di accuratezza:

Prodotto Carterra	Ortorettifica	Accuratezza
<i>Geo</i>	<i>No</i>	<i>25 m</i>
Reference	Si	12 m
Pro	Si	5 m
Precision	Si	2 m
Precision Plus	Si	1 m

Tabella 1. Caratteristiche dei prodotti IKONOS (www.geoeye.com)

I valori di precisione indicati dalla Geoeye, sono relativi ai migliori dati ottenibili. Se però la modalità di acquisizione non è ottimale, le distorsioni dell'immagine possono incrementare notevolmente. Sovrapponendo l'immagine IKONOS georeferenziata, alla CTR della zona (scala 1:25.000), si nota che la distorsione dell'immagine acquisita è di circa 50 m.

I prodotti Carterra Geo sono geometricamente corretti perché inquadrati nel sistema di riferimento cartografico UTM WGS84, ma non sono ortorettificati, perché tale correzione non considera la morfologia del terreno (la quota). Sono disponibili con risoluzione nominale di 1 m nel pancromatico e di 4 m nel multispettrale. Possono essere corredate dell'Image Geometry Model (IGM), modello polinomiale della geometria del sensore, necessario per un'eventuale successiva ortorettifica dell'immagine basata sui parametri orbitali del satellite. In questo caso, si parla di un prodotto Geo Ortho Kit.

Naturalmente, l'accuratezza finale del processo di ortorettifica dipende non solo dalla qualità e dalla definizione del DTM e dei GCP, ma anche dall'angolo di presa con il quale il satellite acquisisce l'immagine. Per questo, se si intende utilizzare il prodotto Carterra Geo per una ortorettifica, è preferibile che l'angolo di presa del sensore sia quasi nadirale, compreso in un intervallo tra 72° e 90° perché siano contenute le distorsioni dell'immagine (Crespi M. et al., 2003). Le immagini IKONOS della costa del Molise sono della tipologia Geo Ortho Kit, corredate quindi dei parametri orbitali per l'utilizzo di modelli matematici che necessitano come dati di input le informazioni relative al volo del satellite nel momento dell'acquisizione.

1.2. DTM

Il modello digitale del terreno (DTM) fornisce una rappresentazione tridimensionale del territorio. È uno strumento base per le applicazioni tematiche (geologiche, tettoniche, ecc.), per la generazione di ortofoto, per i sistemi GIS, ecc.

I modelli digitali a disposizione, sono due:

1. DTM 1: con maglia a 40 m, nel sistema di riferimento cartografico Gauss-Boaga (zona Est), nel datum Roma 40.
2. DTM 2: con passo di campionamento a 20 m, nel sistema cartografico UTM, datum ED50 (fuso 33 Nord).

Le caratteristiche dei due modelli digitali del terreno sono elencati in Tabella 2:

	DTM 1	DTM 2

Sistema di riferimento cartografico		Gauss-Boaga, Roma 40, Zona Est	UTM ED50, Fuso 33, Nord
Cell Size		40 m x 40 m	20 m x 20 m
Numero di righe		1081	1071
Numero di colonne		724	1755
Boundary	Xmin (m)	2.490.400,00	477.431,00
	Xmax (m)	2.533.640,00	499.091,00
	Ymin (m)	4.629.000,00	4.644.017,00
	Ymax (m)	4.657.960,00	4.657.817,00
Formato di supporto informatico		.e00 (ArcGis 9.0)	.adf (raster) (ArcGis 9.0)

Tabella 2. Caratteristiche dei DTM forniti dalla regione Molise

1.3. GCP

I punti di controllo a terra sono stati acquisiti attraverso un rilievo GPS. Le operazioni di campagna per fare le misure sono molto importanti perché il modo in cui si scelgono i punti da rilevare, la loro distribuzione spaziale sull'immagine e l'accuratezza delle misure influiscono sulla bontà del risultato finale. Il numero di punti di cui si deve disporre deve comprendere quelli strettamente necessari per istruire il modello matematico, un certo numero di punti aggiuntivi perché le incognite del problema siano iperdeterminate (per poter applicare la compensazione delle misure basata su modelli stocastici) e i punti di controllo (CP, Check Point) che servono per valutare il risultato dell'elaborazione. I GCP devono essere riconoscibili sull'immagine telerilevata e allo stesso tempo devono essere appropriati per essere rilevati con strumentazione GPS. La campagna di rilievo deve essere sapientemente progettata: per i punti potenzialmente rilevabili individuati sull'immagine è bene trascrivere tutte le informazioni occorrenti per individuare agevolmente il punto sul territorio e velocizzare le operazioni di campagna (Figura 1).

203: Torre di Petacciato			
Descrizione			
Torre di Petacciato. Punto all'imbocco della stradina che porta al mare			
Coordinate approssimate			
UTM	E[m]	N [m]	H [m]
WGS84	483.054	4.654.130	




Figura 1. Scelta dei punti dell'immagine per il rilievo GPS

Generalmente i punti di controllo a terra sono collocati in corrispondenza degli incroci delle strade, in prossimità di infrastrutture e manufatti quali ponti, pozzi, muretti di recinzione, ecc. visibili sull'immagine e stabili nel tempo. È inoltre necessario che la loro distribuzione sia omogenea sul territorio, raggiungendo un corretto compromesso tra distribuzione e posizione ottimale al suolo. In questo modo l'entità dell'errore commesso nel posizionamento sarà sicuramente inferiore a quello prodotto dall'elaborazione senza quel particolare GCP. Nelle zone non abitate e dove non si hanno strade, difficilmente si riescono ad individuare punti adatti al rilievo ed in questi casi è d'obbligo accettare un compromesso tra accuratezza ed assenza di informazioni.

È necessario tenere presente che l'antenna GPS dovrà essere posizionata in modo che possa "vedere" la costellazione dei satelliti che la sovrastano nel modo più ampio possibile. Le zone costiere del Molise della scena considerata sono mediamente abitate ed anche se ampie aree sono dedicate all'agricoltura, il rilievo è stato realizzato secondo modalità ottimali, tranne nella zona Est dell'immagine, in cui si è raffittata la maglia dei punti per sopperire all'indeterminazione della collocazione di alcuni punti. L'indicazione di massima dell'ubicazione dei GCP viene rappresentata da un pallino in Figura 2.

Il codice del punto è stato scelto nel modo seguente:

es: 203: Torre di Petacciato

la prima cifra indica il numero della scena → 2

le ultime due cifre rappresentano il numero progressivo del punto → 03

L'elaborazione dei dati acquisiti è stata eseguita in due fasi: la prima è relativa alla determinazione delle coordinate della stazione master "ALB" posizionata sul terrazzo dell'Hotel Majestic e la seconda relativa alla determinazione di tutti i GCP. Per la prima fase è stata eseguita un'elaborazione in modalità statica, con dati acquisiti per circa 4 ore con epoca di campionamento a 5 sec, prendendo come riferimento la stazione IGM95 (Ponte Cirillo) ed assegnando alla stessa le coordinate geocentriche WGS84 ricavate da monografia. Questa elaborazione è stata eseguita, utilizzando il file delle effemeridi precise distribuito dall'IGS (*International GNSS Service*; GNSS, *Global Navigation Satellite System*). Per la seconda fase è stata eseguita l'elaborazione dei dati raccolti in modalità rapido-statica. La base-line considerata per ciascun GCP, risulta essere quella relativa alla minor distanza dei vari GCP rispetto ad una delle due stazioni master. Il tempo di acquisizione varia tra 10-15 minuti, in funzione della distanza dalla stazione master; più ci si allontana dalle postazioni fisse, più lungo dovrà essere l'intervallo temporale in cui lo strumento dovrà rimanere in acquisizione.

In tutto sono state rilevate le coordinate di 40 GCP. Uno di questi è stato scartato a causa di un errore nella scelta dello stesso. Gli altri punti sono stati utilizzati per l'ortorettifica dell'immagine: tutti i punti che non sfruttati per istruire il modello matematico (GCP) vengono impiegati come CP. Con un rilievo di questi tipo è possibile ottenere coordinate con un'accuratezza centimetrica, ampiamente inferiore alla risoluzione spaziale (1 m) dell'immagine che si deve elaborare. La quota di ogni punto è stata calcolata a partire dalla quota ellissoidica fornita dai sistemi GPS, considerando l'ondulazione del geoide del punto IGM95. Il valore così ottenuto è approssimato, ma accettabile perché nell'ambito di distanze di 10-15 km e lungo la costa, l'ondulazione del geoide può considerarsi costante. Ai fini del presente lavoro i punti rilevati non distano più di 15 km dal punto IGM95.

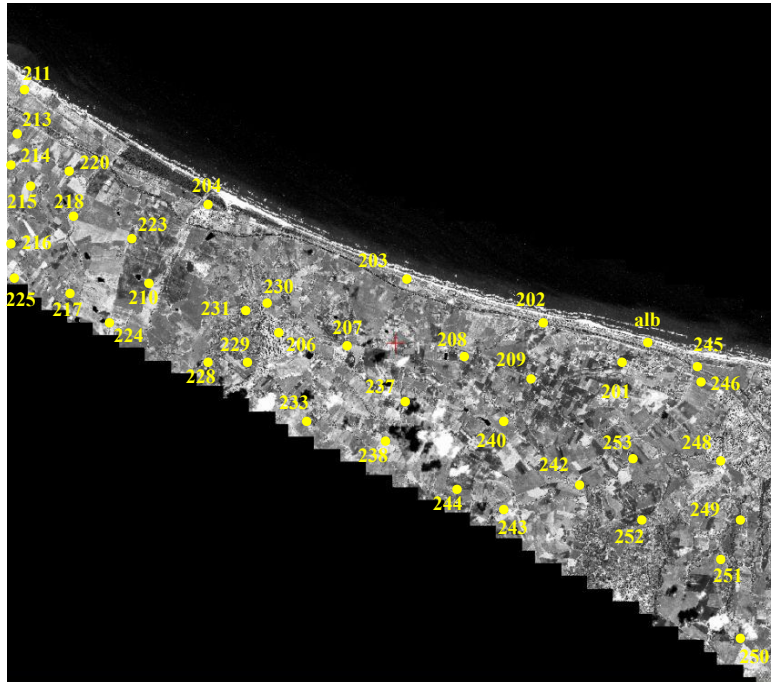


Figura 2. Distribuzione dei punti sull'immagine

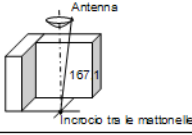


PUNTO ALB: ALBERGO MAJESTIC																		
Collocazione punto		Coordinate punto:																
		WGS 84																
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Geocentriche (m)</th> <th>Geografiche</th> <th>UTM (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X: 4.585.549,799</td> <td>φ: 42°00'36,29"</td> <td>N: 4.650.896,633</td> </tr> <tr> <td>Y: 1.224.726,243</td> <td>λ: 14°57'14,94"</td> <td>E: 496.203,415</td> </tr> <tr> <td>Z: 4.246.476,115</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Geocentriche (m)	Geografiche	UTM (m)	X: 4.585.549,799	φ: 42°00'36,29"	N: 4.650.896,633	Y: 1.224.726,243	λ: 14°57'14,94"	E: 496.203,415	Z: 4.246.476,115			<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Quota Ellissoidica (m)</td> <td>60,091</td> </tr> <tr> <td>Quota Ortometrica (m)</td> <td>14,218</td> </tr> </tbody> </table>		Quota Ellissoidica (m)	60,091
Geocentriche (m)	Geografiche	UTM (m)																
X: 4.585.549,799	φ: 42°00'36,29"	N: 4.650.896,633																
Y: 1.224.726,243	λ: 14°57'14,94"	E: 496.203,415																
Z: 4.246.476,115																		
Quota Ellissoidica (m)	60,091																	
Quota Ortometrica (m)	14,218																	
Schema del punto		ED 50																
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Geocentriche</th> <th>Geografiche</th> <th>UTM (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td>N: 4.651.090,820</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>E: 496.277,367</td> </tr> </tbody> </table>	Geocentriche	Geografiche	UTM (m)			N: 4.651.090,820			E: 496.277,367							
		Geocentriche	Geografiche	UTM (m)														
		N: 4.651.090,820																
		E: 496.277,367																
Fotografia del punto		Gauss – Boaga (Roma 40)																
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Geocentriche</th> <th>Geografiche</th> <th>TM (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td>N: 2.516.208,168</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>E: 2.516.208,168</td> </tr> </tbody> </table>	Geocentriche	Geografiche	TM (m)			N: 2.516.208,168			E: 2.516.208,168							
		Geocentriche	Geografiche	TM (m)														
		N: 2.516.208,168																
		E: 2.516.208,168																
Mapa della zona		Descrizione																
		<p>Lo strumento è stato collocato sul balcone dell'albergo Majestic, situato sulla s.s. adriatica che costeggia il mare. Al balcone si accede dalla sala d'ingresso dell'albergo, tramite la porta che affianca la zona bar</p>																
		Materializzazione																
		<p>Il punto è localizzato all'incrocio delle mattonelle</p>																

Figura 3. Monografia della stazione master collocata nel punto "ALB"

Il lavoro ha lo scopo di monitorare la linea di costa, pertanto è indispensabile materializzarle ogni punto e costruire la monografia della postazione di misura per garantire la ripetibilità delle misure nel tempo.

Una monografia (Figura 3) deve riportare tutte le informazioni utili alla descrizione del punto: le coordinate rilevate, le quote ellissoidica e ortometrica, la schematizzazione, la fotografia e una breve descrizione.

2. ORTORETTIFICA DI IMMAGINI IKONOS AD ALTA RISOLUZIONE

L'ortorettifica dell'immagini IKONOS Carterra Geo Ortho Kit della costa del Molise è stata realizzata con MicroMap 1.0, che è un software tipicamente utilizzato per la fotogrammetria classica e per questo in esso non è implementato il modello rigoroso di Toutin, creato appositamente per l'ortorettifica delle immagini satellitari ad alta risoluzione. I modelli automatici che possiede (DLT e funzioni razionali di secondo e di terzo ordine (RFM)) non richiedono i dati relativi al volo del satellite, che vengono ricostruiti attraverso il modulo di orientamento esterno dell'immagine. Per questo il software è adatto alla correzione geometrica di dati satellitari di cui non sono noti i parametri orbitali.

L'ortorettifica dell'immagine IKONOS della costa del Molise viene realizzata attraverso il modello DLT, caso particolare delle funzioni razionali (Fraser C.S. et al., 2002) che costruisce una correlazione tra i pixel dell'immagine e le coordinate al suolo dei GCP.

2.1. Modello matematico RFM (*Rational Function Model*)

Questo modello può essere usato quando non si dispone di tutte le informazioni orbitali, quando le immagini sono state già processate o quando si lavora su porzioni dell'immagine. Le funzioni del modello matematico possono essere espresse nella forma (Toutin T., 2004; Toutin T. et al., 2002):

$$RFM_{3D}(x,y,z) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} x^i y^j z^k}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p b_{ijk} x^i y^j z^k}$$

dove: x, y, z sono le coordinate cartografiche
 i, j, k sono indici interi
 m, n, p sono variabili intere, generalmente comprese tra 0 e 3
 $m + n + p$ è il grado del polinomio

Esistono funzioni razionali del primo, del secondo e del terzo ordine che presentano rispettivamente 8, 20 e 40 termini incogniti. Le funzioni razionali nello spazio tridimensionale non sono altro che un'estensione delle equazioni di collinearità che vengono utilizzate nel modello matematico rigoroso (Toutin T., 2004; Toutin T. et al., 2002). I risultati prodotti dalle funzioni razionali sono meno accurati di quelli del modello di Toutin a parità di numero di punti impiegati. Se però, si aumenta il numero di GCP allora i risultati diventano confrontabili. L'uso delle funzioni razionali è vantaggioso perché risentono poco degli errori di interpolazione. (Fraser C.S. et al., 2002).

2.2. Modello matematico DLT (*Direct Linear Transformation*)

La trasformazione è una valida alternativa alle equazioni di collinearità. Viene usata per l'orientamento e la triangolazione in fotogrammetria e la sua caratteristica principale è che è un modello di proiezione lineare. La DLT si applica di frequente anche per l'orientamento delle immagini satellitari, con la seguente forma (Fraser C.S. et al., 2002):

$$x_{ij} = \frac{L_1^i X_j + L_2^i Y_j + L_3^i Z_j + L_4^i}{L_9^i X_j + L_{10}^i Y_j + L_{11}^i Z_j + 1} + L_{12}^i x_{ij} y_{ij}$$
$$y_{ij} = \frac{L_5^i X_j + L_6^i Y_j + L_7^i Z_j + L_8^i}{L_9^i X_j + L_{10}^i Y_j + L_{11}^i Z_j + 1}$$

dove: x_{ij} , y_{ij} sono le coordinate spaziali nel volo, per l'immagine i e per il punto j

X_j , Y_j , Z_j sono le coordinate cartesiane del punto nello spazio

L_k^i , $k = 1, 12$ sono i parametri della trasformazione

Quindi il modello è quello effettivamente applicato in fotogrammetria, con l'aggiunta di un parametro ausiliario L_{12} . La triangolazione delle immagini che utilizzano questa trasformazione per l'orientamento non richiede la conoscenza dei parametri del sensore al fine di determinarne l'orientamento dell'immagine. I coefficienti della trasformazione sono valutati con il metodo dei minimi quadrati dalla serie di punti di controllo (GCP) di coordinate note, identificati sull'immagine. Il numero di punti di controllo strettamente necessario per calcolare le incognite del problema, utilizzando la DLT, è pari a 5, ma è necessario istruire il modello con molti punti per avere dei buoni risultati (Fraser C.S. et al., 2002).

2.3. Procedura di ortorettifica

Le immagini IKONOS, le coordinate dei GCP e i DTM non georiferiti in sistemi di riferimento cartografico e datum tra loro coerenti, sono stati trasformati e riproiettati. L'immagine e i GCP inizialmente nel sistema WGS84, sono stati trasformati in Gauss-Boaga, Roma 40, coerentemente con il DTM 1. Per evitare di aggiungere l'errore di riproiezione al DTM 1, costruito con un passo spaziale molto ampio (40 m x 40 m), si è deciso di convertire gli altri dati nello stesso sistema del DTM 1. Anche il DTM 2 è stato convertito in Gauss-Boaga, Roma 40, convenendo che trasformare la proiezione UTM ED50, in Gauss Boaga producesse, per l'area considerata, un errore trascurabile rispetto alla riproiezione dell'immagine e dei GCP in UTM ED50.

Le coordinate dei punti di controllo sono state convertite con il software Geotrans 2.2.1, mentre le immagini con Envi 4.3. Con questa trasformazione, l'informazione radiometrica dell'immagine originale a 11 bit è stata ridotta a 8 bit, comportando una perdita di informazione. Le immagini compresse nel formato .ecw per agevolare l'elaborazione hanno subito un ulteriore degrado, che per questo caso specifico, non ha costituito problema, ma che può compromettere l'accuratezza della fotointerpretazione dell'immagine, se questa deve essere utilizzata per creare una carta dell'uso del suolo.

Per ortorettificare l'immagine, sono state utilizzate diverse configurazioni di GCP (9, 15, 20, 25, 30) con i punti distribuiti uniformemente sull'immagine per cercare di ottenere la miglior ortorettifica utilizzando il minor numero di GCP. I test sono stati condotti inizialmente con il DTM 1 (40 m), e successivamente anche con il DTM 2 (20 m) fornito in un secondo momento. Le prove di ortorettifica con il DTM 2 sono state condotte facendo riferimento ai risultati ottenuti con il DTM 1, ottenendo esiti analoghi, e come nel primo caso, indipendentemente dal software con cui si sono trasformate le coordinate dei punti.

2.4. Valutazione dell'accuratezza e risultati

Gli errori sono stati valutati nel corso nella fase di istruzione del modello matematico (DLT), oltre che sull'immagine ortorettificata. L'errore prodotto dal posizionamento dei punti per istruire il modello matematico è espresso in pixel (o equivalentemente in metri, poiché la risoluzione spaziale dell'immagine è pari 1 m) e può essere letto interattivamente durante l'immissione dei punti e questo è utile per identificare i GCP che producono errori più alti. Esso è riportato in termini di deviazione standard sia per la direzione delle X (coordinata Est) che per la direzione delle Y (coordinata Nord).

Il Grafico 1 riporta l'andamento dell'indeterminazione media nella valutazione dei parametri del modello in funzione del numero di GCP. Aumentando il numero di GCP incrementa il valore dei residui dell'orientamento, ma migliora l'accuratezza del risultato dell'ortorettifica, sia pure all'interno della risoluzione dell'immagine (Grafico 2).

In Tabella 3 viene riportata l'entità dell'indeterminazione dei parametri del modello in funzione del numero di GCP, sempre in termini di deviazione standard media, in direzione X e Y.

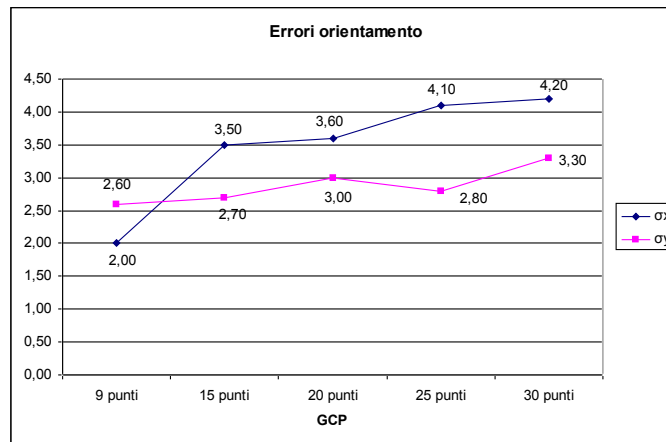


Grafico 1. Errori (in pixel) commessi nella determinazione dei parametri del modello DLT, espressi in termini di deviazione standard nella direzione delle X (σ_x) e nella direzione delle Y (σ_y), in funzione del numero di GCP

	9 GCP	15 GCP	20 GCP	25 GCP	30 GCP
σ_x	2,00	3,50	3,60	4,10	4,20
σ_y	2,60	2,70	3,00	2,80	3,30

Tabella 3. Valutazione quantitativa dell'errore di orientamento (determinazione dei parametri del modello)

L'accuratezza dell'immagine ortorettificata può essere valutata sia in termini qualitativi, che quantitativi. Stimare qualitativamente l'errore è utile nel corso dei primi test, per stabilire se il procedimento adottato ha portato risultati accettabili o meno. È possibile sovrapporre l'immagine ortorettificata alle CTR confrontando la posizione di oggetti notevoli, come strade, edifici, ecc. In Figura 4 (1), si osserva come le strade rappresentate sull'immagine non rettificata siano sensibilmente discoste da quelle raffigurate sulla CTR (scala 1:25.000), mentre per l'immagine ortorettificata, esse praticamente coincidono. In Figura 4 (2) le curve di livello del DTM 1 mostrano che i valori della quota associata ai pixel dell'immagine ortorettificata (30 GCP) sono approssimativamente simili alle altitudini dei CP.

A livello quantitativo si può valutare l'accuratezza della trasformazione confrontando le coordinate dei punti dell'immagine elaborata, con le coordinate dei CP. Se si calcola la differenza tra i due valori, si ottiene il residuo della trasformazioni.

La qualità dei residui deve essere valutata dall'operatore in base ai requisiti che l'immagine ortorettificata deve soddisfare. Se i residui sono troppo elevati l'operatore ha a disposizione tre scelte possibili (Crespi M. et al., 2003):

1. Aggiungere altri GCP: un numero maggiore di GCP consente di ottenere una distribuzione dei punti più equilibrata ed omogenea e di diminuire l'effetto di eventuali punti errati nella determinazione della funzione matematica.
2. Eliminare i GCP a precisione minore: è la procedura consigliata per i punti che hanno residuo significativamente superiore a quello medio. Nell'eliminare i GCP bisogna essere assolutamente sicuri di lasciare un numero di punti sufficiente per ottenere un'interpolazione corretta dal punto di vista statistico.
3. Usare una trasformazione di ordine superiore: questa scelta è quella che dovrebbe essere lasciata per ultima ed effettuata solo se non esiste altro modo di aumentare l'accuratezza della trasformazione.

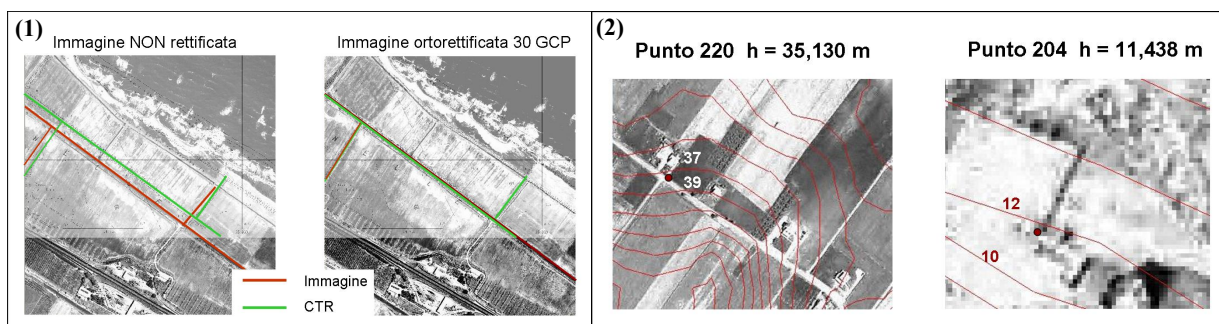


Figura 4. Valutazione qualitativa dell'ortorettifica. (1) Confronto tra immagine: a. Non rettificata; b. Ortorettificata (con 30 GCP) sovrapposta alla CTR (2) Sovrapposizione del DTM 1 all'immagine ortorettificata con 30 GCP

In Grafico 2 si riporta l'andamento dell'errore residuo sull'immagine ortorettificata, in funzione del numero di GCP e di CP. Il valore dell'indeterminazione (in pixel, o in m per risoluzione spaziale di 1 m) è espresso in termini di deviazione standard, sia in planimetria (σ_x , σ_y) che in altimetria (σ_z). In grafico sono riportati i valori medi di deviazione standard relativi alle prove realizzate.

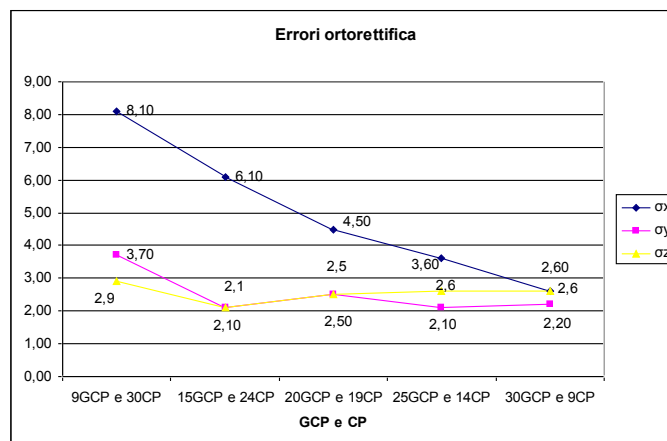


Grafico 2. Andamento dell'errore (in pixel) commesso nell'ortorettifica valutato sull'intera immagine nella direzione delle X (σ_x), nella direzione delle Y (σ_y) e nella direzione delle Z (σ_z) rappresentato in funzione del numero di GCP e di CP

In Tabella 4 viene riportato l'entità dell'errore in funzione del numero di CP, strettamente legato al numero di GCP.

	9 GCP e 30 CP	15 GCP e 24 CP	20 GCP e 19 CP	25 GCP e 14 CP	30 GCP e 9 CP
σ_x	8,10	6,10	4,50	3,60	2,60
σ_y	3,70	2,10	2,50	2,10	2,20
σ_z	2,90	2,10	2,50	2,60	2,60

Tabella 4. Valutazione quantitativa dell'errore dell'immagine ortorettificata

	Errori orientamento		Errori ortorettifica		
	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_z

Test 1 (DTM 1)	4,6	2,1	4,5	2,6	2,5
Test 2 (DTM 1)	2,7	1,5	4,5	2,3	2,4

Tabella 5. Valutazione quantitativa dell'errore: confronto tra due procedure di ortorettifica: 20 GCP e 19 CP, DLT e DTM 1

	Errori orientamento		Errori ortorettifica		
	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_z
Test 2 (DTM 1)	2,7	1,5	4,5	2,3	2,4
Test 3 (DTM 2)	2,8	1,4	4,4	1,8	2,1

Tabella 6. Valutazione quantitativa dell'errore: confronto risultati di ortorettifica ottenuti con diversi DTM (DTM 1 e DTM 2) a parità di altre condizioni (20 GCP e 19 CP nella stessa configurazione, DLT)

L'accuratezza nella determinazione dei parametri del modello matematico, non influisce eccessivamente sul risultato dell'ortorettifica a parità di numero di GCP e utilizzando lo stesso modello matematico DLT e lo stesso DTM.

Con 20 GCP e DTM 1 e DLT, dimezzando l'errore di orientamento dell'immagine, l'errore dell'ortorettifica rimane costante (Tabella 5). Utilizzare DTM 1 e DTM 2 per ortorettificare l'immagine porta ad ottenere risultati analoghi, utilizzando lo stesso modello matematico (DLT), GCP (20) e CP (19) nella stessa configurazione (Tabella 6).

CONCLUSIONI

L'ortorettifica di immagini satellitari ad alta risoluzione è operazione delicata e per ottenere risultati accurati è necessario disporre di informazioni dettagliate relativamente a GCP e DTM da utilizzare.

L'ortorettifica di immagini IKONOS con risoluzione spaziale di 1 m (nel pancromatico), può potenzialmente produrre risultati molto accurati generando un'immagine corretta con un'indeterminazione di 1 m, utilizzando un DTM con passo di campionamento inferiore a 5 m e il modello matematico rigoroso di Toutin (Toutin T. et al., 2002). Nelle esperienze da noi condotte con il modello matematico DLT, 30 GCP rilevati con sistemi di posizionamento GPS (con accuratezza centimetrica) e un DTM con passo di campionamento superiore a 20 m, si è ottenuta una precisione di 2-3 m, sia in planimetria che in altimetria. L'errore residuo è dovuto principalmente al passo di campionamento del DTM ed anche all'imprecisione nell'individuazione dei punti (GCP e CP) sull'immagine. L'ortorettifica di un'immagine satellitare ad alta risoluzione con DTM a maglia molto larga (>20 m) produce risultati non adeguati alla produzione di cartografia a media e grande scala (da 1:10.000 a 1:5.000), ma possono essere sfruttati per il monitoraggio del degrado della linea di costa, nel suo avanzamento o nel suo arretramento. Anche se la scala della carta è di 1:10.000 e l'errore ammesso aumenta a 2 m, il risultato dell'ortorettifica non è comunque adeguato. La zona indagata è in un territorio costiero e l'ortorettifica di queste aree è problematica (Dominici D. et al., 2006) La ristrettezza della fascia costiera rappresentata nell'immagine fa sì che i GCP non siano uniformemente distribuiti sul territorio, almeno non sull'intera area dell'immagine. Questo comporta che gli algoritmi di correzione dell'immagine siano impiegati non al massimo delle loro potenzialità: ed è quasi sempre necessario un numero maggiore di punti rispetto a quello consigliato. L'ortorettifica è stata condotta determinando i parametri del modello matematico con GCP posizionati su tutta l'immagine. La precisione dell'immagine ortorettificata, può essere valutata globalmente su tutta l'immagine o solo su porzioni di essa. Le aree pianeggianti nei pressi della costa, o quelle con morfologia non troppo varia sono ortorettificate in modo più accurato rispetto alle zone che presentano brusche variazioni di quota.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Ing. Flamigni e la Ditta GeoIn che hanno fornito il software Micromap 1.0. (GeoIn s.r.l, Sistemi informativi territoriali, Via G. Da Cascia, 27 Firenze, Italia)

BIBLIOGRAFIA

Baiocchi, V., Betti, B., Carrion, D., Giannone, F., Tornatore F., 2006. Orthorectification of a satellite EROS A1 Milan Image by GPS RTK control and check points: different models comparison. *Bollettino SIFET* (Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia), 4, pp. 79-93

Dominici D., Feltrami G. M., De Girolamo P., 2006. Ortorettifica di Immagini satellitari ad alta risoluzione finalizzata al monitoraggio costiero a scala regionale.

Toutin T., 2004. Review article: Geometric Processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (10), pp. 1893-1924.

Crespi M., Baiocchi V., De Vendictis L., Lorenzon F., 2003. Impiego di immagini satellitari ad alta risoluzione - le problematiche metriche: dati primari, metodologie, sperimentazioni.

Dial G., Grodecki J., 2003. Applications of IKONOS Imagery. In *Proceedings of ASPRS 2003 Conference*, Anchorage, Alaska, May 5-9, 2003.

Fraser C. S., Hanley H. B., Yamakawa T., 2002. Three Dimensional Geo-positioning accuracy of IKONOS Imagery. *Photogrammetric Record*, 17 (99), pp. 465-479.

Toutin T., Ch ernier R., Carbonneau Y., 2002. 3D models for high resolution images: examples with QuickBird, IKONOS and Eros. *International Archives of ISPRS Symposium*. 43 (4), pp. 457-551

Geoeye, 2007. <http://www.geoeye.com> (accessed 24 January, 2007)