

IL CONTENUTO INFORMATIVO DI IMMAGINI ACQUISITE MEDIANTE SENSORI DIGITALI PER APPLICAZIONI CARTOGRAFICHE E AMBIENTALI

A. Lingua^a, F. Nex^a, F. Rinaudo^a

^a Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie, 10129 Torino (TO), Italia – (andrea.lingua, francesco.nex, fulvio.rinaudo)@polito.it

KEY WORDS: fotogrammetria digitale, camere digitali aeree, contenuto informativo

RIASSUNTO

Le prime camere digitali montate su piattaforma aerea sono state presentate per la prima volta in occasione del Congresso Internazionale ISPRS nel 2000. Da allora, nel corso degli anni, sono stati realizzati numerosi contributi che ne analizzano le caratteristiche metriche, partendo dal presupposto non provato che il dato acquisito da queste camere digitali sia comparabile in termini di contenuto con il dato delle già note camere analogiche acquisite alla stessa scala.

Questo contributo si pone invece come obiettivo proprio l'analisi di quegli aspetti semantici che finora sono stati scarsamente considerati, o comunque affrontati in modo non esaustivo. In particolare, si valutano in termini quantitativi e qualitativi la leggibilità dei dati forniti da alcune camere digitali attualmente a disposizione (*ADS40* di *Leica Geosystems*, *DMC* di *Intergraph/ZI-Imaging*, *UltracamD* di *Vexcel Corp.*) per la produzione di cartografia a differenti scale.

Non saranno quindi esaminate le prestazioni delle camere dal punto di vista geometrico, ma al contrario sarà discussa la qualità delle immagini realizzate da queste camere sotto l'aspetto semantico, ossia analizzando la loro capacità di fornire un contenuto informativo (dettaglio e radiometria) sufficiente per la restituzione del territorio con finalità cartografiche ed ambientali. Le valutazioni sono basate sui moderni capitolati speciali d'appalto per la produzione di cartografia numerica a media, grande e grandissima scala.

ABSTRACT

Aerial digital cameras were firstly presented on the occasion of the 2000 ISPRS International Symposium. Ever since, several papers have been presented in order to analyze the digital camera geometrical accuracy. These works consider, without any scientific evidence, the digital camera products comparable, from a semantic point of view, with traditional photogrammetric camera products acquired at the same nominal scale.

In spite of that, in this paper the semantic information of digital images is accurately analyzed, neglecting the geometrical aspect. In particular the semantic information is considered both from a qualitative and quantitative point of view evaluating the image quality and information content of several digital sensors (*ADS40* *Leica Geosystems*, *DMC* *Intergraph ZI*, *UltraCamD* *Vexcel Corp.*) commonly employed in the map production at different scales. In this analysis, particular attention is given to the handiness of interpretation of details which are requested in modern technical specifications (at several scales) for map production.

1. INTRODUZIONE

L'utilizzo di una tecnica completamente digitale per il rilievo e la conoscenza del territorio ha origine con l'acquisizione di immagini digitali mediante sensori montati su piattaforma satellitare. In particolar modo, l'avvento negli ultimi anni di sensori satellitari ad alta risoluzione ha permesso di approfondirne l'uso applicativo valutandone le possibilità operative in ambito cartografico e ambientale.

Numerosi studi (Boccardo, 2005 e 2006, Jacobsen, 2006) hanno permesso di affermare che tali dati possono essere utili per estrarre informazioni geometriche del territorio per una scala nominale non più grande di 1:10000 e comunque con alcune difficoltà operative (utilizzo di modelli rigorosi, disponibilità e modalità di acquisizione di scene stereoscopiche, poca flessibilità a causa di pianificazione dell'orbita già definita, copertura nuvolosa, ecc.).

Le immagini acquisite da satellite non sono quindi, ad oggi, in grado di fornire informazioni utili (in termini di precisione e di contenuto informativo) per la produzione di cartografia numerica a grande e grandissima scala, lasciando alla fotogrammetria aerea questo ampio ambito applicativo.

Attualmente, almeno in Italia (un po' meno nel mondo), le tecniche fotogrammetriche utilizzate e previste dai moderni capitolati speciali d'appalto prevedono, in buona sostanza, un approccio basato su camere fotogrammetriche analogiche e restitutori analitici, mentre solo in alcuni casi sono ammessi l'acquisizione indiretta delle immagini digitali (scanner fotogrammetrico), i restitutori digitali e le tecniche fotogrammetriche dirette e affini; molto raramente sono ammesse le camere digitali aeree. Nonostante questa tendenza normativa italiana, il futuro delle camere analogiche non è sicuramente florido: *Intergraph ZI* ha interrotto la produzione di camere fotogrammetriche analogiche, *Leica Geosystems* costruirà un'ultima serie di 6 camere analogiche e poi interromperà probabilmente la produzione, *Agfa* ha annunciato la sospensione della produzione delle pellicole (esistono comunque scorte) e in un pochi anni non ci sarà più disponibilità di pellicola per le attuali 600-800 camere che operano attualmente nel mondo (Casella, 2006).

Le tecniche puramente digitali basate su piattaforma aerea sono sempre più diffuse, spinte non solo da esigenze cartografiche ma anche da una necessità di maggiore conoscenza globale del territorio mondiale su cui si basano i diffusissimi software *Google Earth* e *Microsoft Visio*. *Microsoft* ha infatti recentemente acquisito la ditta *Vexcel*, una delle principali produttrici di camere digitali.

Nel corso di questa diffusione commerciale sviluppatasi sostanzialmente negli ultimi 7 anni, sono state proposte numerose camere digitali aeree che utilizzano diverse tecnologie e differenti soluzioni ottiche ed elettroniche: da un lato troviamo le camere con sensori lineari che estendono le tecnologie usate da piattaforma satellitare (*pushbroom*) come la *ADS40* di *Leica Geosystem* (la I generazione è disponibile dal 2000, la II generazione è in fase avanzata di studio), la *TLS* di *Starlabo Starimager*, la *JAS* di *Jenoptik*,

la 3-DAS-1 di Wehrli & Associates e dall'altro le camere con sensori areali (*frame*) come la DSS 322 di Applanix, la DMC di Z/I, la UltracamD e da poco la UltracamX di Vexcel, la DIMAC di DIMAC Systems, (Galetto, 2004, Cramer, 2006, Casella, 2006).

1.1 I vantaggi delle tecniche digitali

Le tecnologie puramente digitali hanno aperto nuove intuibili opportunità (Reulke, 2003).

Innanzitutto, i sistemi digitali permettono un risparmio in termini di costo all'interno del processo fotogrammetrico in quanto non richiedono la pellicola fotografica e lo sviluppo in laboratorio fotografico migliorando le possibilità di automazione. Un ulteriore risparmio indiretto è legato alla necessità (non richiesta con camere digitali) di dotarsi di scanner fotogrammetrici, strumenti costosi e complessi che richiedono spesso continue operazioni di manutenzione specializzata. In termini di tempo, le camere digitali permettono inoltre una velocizzazione del processo fotogrammetrico in quanto non richiedono lo sviluppo della pellicola, la sua stampa su diapositiva o su carta e la traduzione in formato digitale mediante scanner fotogrammetrico, annullando sostanzialmente i tempi che intercorrono tra volo e fasi di orientamento o di restituzione se si usano tecniche di fotogrammetria diretta.

La qualità radiometrica, nel visibile, delle immagini acquisite con camera digitale (Kolbl, 2005, Leberl et al., 2005, Neumann, 2004), è almeno uguale se non superiore a quella ottenibile con l'acquisizione indiretta: le immagini sono memorizzate a 12 bit per canale, migliorando il range dinamico (anche 1:30 contro 1:10 delle pellicole a colori) e il rapporto segnale rumore; i bordi radiometrici sono più evidenti e con pendenza maggiore mentre le ombre sono più leggibili. La qualità delle immagini acquisite può essere verificata direttamente in fase di volo evitando costosi errori grossolani (rifacimento del volo). Inoltre, i sistemi digitali permettono l'acquisizione integrata di informazioni radiometriche che vanno al di là del campo del visibile (RGB), nell'infrarosso (NIR) costituendo insiemi metrici integrati di dati multispettrali utili alle applicazioni proprie del telerilevamento o che comunque aiutano le operazioni di fotointerpretazione in fase di restituzione.

Infine, l'utilizzo di camere digitali rende economicamente sostenibile l'acquisizione del territorio in doppia o quadrupla stereoscopia, ovvero con immagini ridondanti per ogni porzione dell'oggetto ripreso: la collimazione manuale o automatica diventa spesso controllabile (stima dell'incertezza di misura) e robusta; è possibile aggirare problemi di ostruzione e zone defilate; aumentano la ridondanza e la robustezza in triangolazione aerea. La generazione dei DTM può utilizzare tecniche *multi-ray* (*multi constrained least square matching*) con maggior possibilità di individuare *outlier* e *gross errors* mentre la produzione di ortofoto può essere fortemente automatizzata rendendo disponibili i dati necessari per la produzione di ortofoto di precisione con approccio multi-immagine (Dequal et al, 2001).

Quindi, l'utilizzo di camere digitali aeree permette la nascita di nuovi tipi di informazioni (misure assolute multispettrali), nuovi prodotti (ortofoto di precisione più rapida, fusione tra dati multispettrali e DTM ecc.) e nuove possibilità di integrazione con dati derivati da altre strumentazioni (ad es. LIDAR), ma richiede un insieme di analisi che ne validi le potenzialità e le modalità operative.

1.2 Le motivazioni dello studio

Le camere analogiche sono in uso da alcuni decenni e hanno raggiunto caratteristiche costruttive ormai stabilizzate attorno a standard di fatto. Ad esempio, il formato delle pellicole è 23x23 cm, l'ottica più comune (grandangolare) ha focale di circa 150 mm, anche se esistono ottiche normali (con distanza principale di circa 300 mm) o supergrandangolari (70 mm). Tutte le ottiche sono generalmente dotate di apparati di controllo e compensazione del trascinamento ed hanno un insieme di informazioni che vengono impresse sulla pellicola all'atto dello scatto (data, numero fotogramma, livella sferica, ecc.).

Esistono inoltre numerosi esempi di capitolati speciali d'appalto (CSA) per la produzione di cartografia numerica a grande scala che ne regolano le caratteristiche e le modalità di utilizzo. Per esempio una cartografia in scala 1:1000 deve essere prodotta con un volo in scala media 1:5000, con una camera avente focale circa 150 mm, volando ad un'altezza relativa di 750 m. Analoghi esempi possono essere fatti per le altre scale.

Come descritto in bibliografia (ad es. Leberl et al., 2005 per Ultracam D, Heier et al., 2001 e Neumann, 2004 per la DMC, Fricker, 2001 per la ADS40) e sinteticamente nel paragrafo 2, le camere digitali hanno caratteristiche molto innovative e molto diverse dalle camere analogiche, e anche differenti tra loro. Ad esempio, la Ultracam D di Vexcel utilizzata nei test successivi ha una distanza principale di 101.4 mm, un sensore fittizio finale (ottenuto dalla composizione di più acquisizioni sincronizzate) di 11500x7500 pixels da 9 µm, che corrispondono ad una dimensione fisica di 10.30 x 6.75 mm².

E' necessario pertanto effettuare test e verifiche per valutare le possibilità operative di tali camere in ambiti cartografici e ambientali, al fine di stabilire nuove norme e nuovi standard che aggiornino i CSA attuali.

Sono numerosi in letteratura i contributi che valutano le potenzialità di queste camere essenzialmente dal punto di vista metrico (Cramer, 2005 e 2006, Casella, 2004). Tali test utilizzano in genere poligoni a terra posizionati con tecniche GPS di precisione e realizzati con punti presegnalizzati, con elevato contrasto radiometrico locale e geometrie studiate per una collimazione ottimale (in genere sostanzialmente posti in zone piane, molto chiari rispetto al sfondo scuro, ecc.). Tali punti garantiscono, specialmente in collimazione assistita con autocorrelazione, precisioni di posizionamento anche 3-5 volte maggiori rispetto alle precisioni ottenibili nella collimazione stereoscopica di generici punti di descrizione di elementi naturali o artificiali di oggetti presenti sul territorio, come descritto in bibliografia (Krauss, 1997). Inoltre, il risultato delle verifiche viene proposto in forma di scarti e scarti quadratici medi (risultanti dall'operazione di compensazione ai minimi quadrati della triangolazione fotogrammetrica) delle coordinate di un sottinsieme dei punti del poligono utilizzati come *check point* (gli altri punti sono utilizzati come punti d'appoggio, *control points*): non sono pertanto risultati diretti di restituzioni stereoscopiche come invece si mette in pratica quando si restituisce una cartografia. In questo modo, non si valuta fino in fondo l'efficacia della collimabilità di tutti i dettagli da cartografare i quali non sono (se non in rari casi) paragonabili a target segnalizzati "ad hoc".

In questo contributo non si ha intenzione di verificare la bontà di una tecnica rispetto all'altra, di una camera rispetto alle altre, ma si tenta solamente di valutarne l'applicabilità cartografica in termini semantici ed in particolar modo per la sola parte legata alla corretta leggibilità e fotointerpretazione dei dettagli richiesti delle entità cartografiche da rappresentare a grande e grandissima scala (1:10000, 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500). Nel test descritto nel paragrafo 2, si utilizzeranno le 3 camere digitali più comuni, visibili in tabella 1 (ADS40 di Leica Geosystems, UltraCamD di Vexcel, DMC di Z/I), che secondo [Cramer, 2005] rappresentano circa il 70% del mercato mondiale delle camere digitali installate su piattaforme aeree.

1.3 Una base da cui partire

Fino all'avvento delle camere digitali aeree, le applicazioni cartografiche territoriali e ambientali hanno avuto la possibilità di utilizzare i restitutori digitali e le tecniche digitali in generale, previa acquisizione indiretta del dato primario (le immagini digitali) mediante scanner fotogrammetrico. In letteratura (Krauss, 1994, Baltavias, 1999, Casella, 2006) sono definite le risoluzioni massime (per la restituzione cartografia è ormai uno standard l'acquisizione a 1800 dpi per una dimensione del pixel 14-15 μm) e minime (600 dpi corrispondenti a una dimensione del pixel di circa 42 μm). Nella pratica comune, è stato verificato che per applicazioni specifiche (la produzione di DTM, generazione ortofoto, ecc.) sono sufficienti immagini alla risoluzione di circa 1200 dpi (pixel da circa 21 μm).

Scala cartografica <i>I:</i>	Scala media fotogr. <i>I:</i>	1800 dpi (min)		600 dpi (max)		1200 dpi (med)	
		dim.pixel [m]	GSD [m]	dim.pixel [m]	GSD [m]	dim.pixel [m]	GSD [m]
500	3000	14,1	0,042	42,3	0,127	21,2	0,064
1000	5000	14,1	0,071	42,3	0,212	21,2	0,106
2000	8000	14,1	0,113	42,3	0,339	21,2	0,169
5000	15000	14,1	0,212	42,3	0,635	21,2	0,318
10000	20000	14,1	0,282	42,3	0,847	21,2	0,423

Tabella 1. GSD per immagini digitali ottenute mediante acquisizione indiretta per le varie scale cartografiche

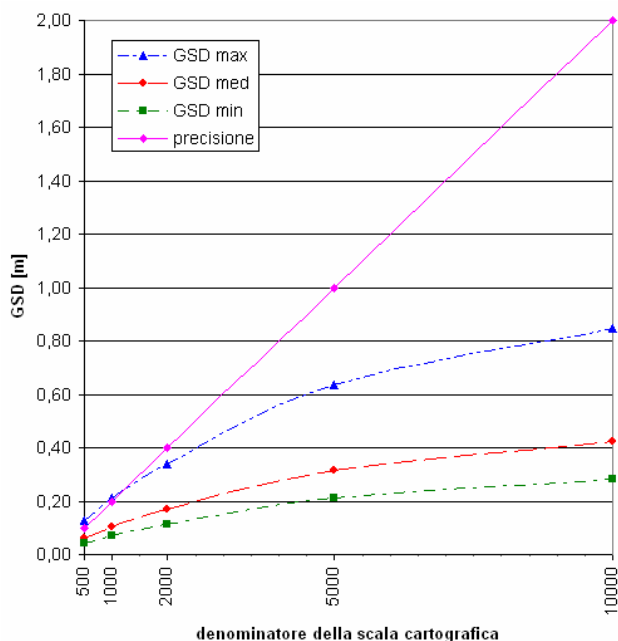


Figura 1. GSD per immagini digitali acquisite in modo indiretto

descritte che pongono una base importante e sicura, in quanto corroborata da alcuni anni di esperienza, facilmente estendibile al caso puramente digitale. Per semplicità, nelle analisi successive è stato arbitrariamente scelto come dato di confronto solamente il caso indicato come GSD med (linea tratteggiata rossa in figura 1, 1200 dpi), analoghe considerazioni potranno essere svolte per GSD max e GSD min.

2. METODOLOGIA OPERATIVA

Come già affermato in precedenza, questo contributo è rivolto ad analizzare la capacità di fornire un contenuto informativo (dettaglio e affidabilità di collimazione) sufficiente per la restituzione del territorio con finalità cartografiche ed ambientali. Allo scopo sono stati utilizzati 3 voli fotogrammetrici eseguiti su territori differenti (Oulx, Graz e Lauria) acquisiti con 3 sensori differenti (ADS40 di Leica Geosystems, UltraCamD di Vexcel, DMC di Z/I) a diverse altezze relative di volo.

Nella tabella 2 sono riassunte le caratteristiche tecniche di questi sensori ed alcune informazioni sui voli con essi realizzati. Viste le differenti caratteristiche delle camere utilizzate in termini di distanza principale, dimensione del pixel del sensore, dimensione del sensore e realizzazione della stereoscopia, non è possibile utilizzare l'altezza relativa di volo (H) come dato di descrizione sintetica, come avviene con le camere analogiche. Come proposto da [Casella, 2006], si utilizza come dato di riferimento la dimensione media del pixel a terra (GSD = Ground Sample Distance) che riesce a esprimere correttamente la relazione esistente tra altezza relativa di volo, distanza principale e risoluzione del sensore.

La tabella 1 indica i valori tipici delle caratteristiche dei voli fotogrammetrici per le varie scale compreso il calcolo della dimensione media al suolo del pixel (GSD = Ground Sample Distance) delle immagini digitali derivanti da acquisizione indiretta per le risoluzioni di scansione indicate in precedenza (600, 1200 e 1800 dpi). La figura 1 riporta tali valori in forma di grafico inserendo in ascissa il denominatore della scala cartografica e in ordinata i GSD corrispondenti. Come ben noto, la figura 1 mostra che:

- il GSD si mantiene sempre al di sotto della precisione della cartografia;
- la relazione che lega il GSD con il denominatore di scala non è lineare;
- la distanza tra la retta delle precisioni e la curva del GSD cresce con il denominatore di scala (aumenta con il diminuire della scala).

Questi comportamenti non sono sostanzialmente legati alla precisione da raggiungere, ma sono fortemente collegati agli aspetti semantici che condizionano la restituzione. Infatti, al diminuire della scala di rappresentazione, tende a divenire sempre più importante, rispetto alla precisione, la capacità di interpretare e restituire metricamente tutte le entità e tutti i dettagli che sono richiesti nei moderni repertori allegati ai CSA per la produzione di cartografia numerica.

E' necessario indagare con grande attenzione e indipendenza questi aspetti, senza trascurare le considerazioni appena

Ricordiamo che lo scopo del lavoro non è stabilire quale sia la miglior camera, ma piuttosto fino a quale scala di rappresentazione cartografica sia possibile spingersi in termini semantici con una certa camera e un certo volo: non è volontà degli autori effettuare confronti tra differenti camere, che richiederebbero voli con lo stesso GSD sulla stessa porzione di territorio.

La procedura operativa, in prima istanza, cerca la possibile scala cartografica di riferimento paragonando il GSD con il grafico contenuto in figura 1. In particolare è stata scelta la scala cartografica a cui corrispondeva un GSD dell'acquisizione indiretta (in tabella 1 ultima colonna) di poco inferiore: questa scelta è stata giustificata dai numerosi contributi presenti in letteratura che tendono ad affermare l'elevata qualità radiometrica delle immagini acquisite con camera digitale aerea.

Tale considerazione è stata poi verificata dagli autori in base all'esperienza e a considerazioni qualitative visive, osservando rapidamente quali elementi fossero riconoscibili. Da questa analisi è stata quindi ipotizzata quale fosse la scala cartografica più grande realizzabile per ciascun blocco fotogrammetrico.




SENSORE			
	<i>ADS40</i>	<i>UltraCamD</i>	<i>DMC</i>
Lunghezza focale [mm]	62,7	101,4	120
Pixel size [μ m]	6,5	9	12
Geometria	Pushbroom	Frame	Frame
Dimensione sensore [pixel]	12000 (per linea)	11500x7500	13000x8000
Quota relativa di volo [m]	6000	900	1200
Scala media nominale del fotogramma	100000	9000	10000
GSD [m]	0,62	0,08	0,12
Località	<i>Oulx (TO)</i>	<i>Graz (Austria)</i>	<i>Lauria (SA)</i>

Tabella 2: Caratteristiche tecniche dei sensori utilizzati e specifiche voli eseguiti

In seguito, è stato verificato che tutti i particolari cartografici elencati nei CSA relativi alle scale considerate fossero realmente riconoscibili sui fotogrammi e metricamente restituibili. Per ciascun volo, questo lavoro di verifica è stato affrontato mediante una vera e propria operazione di restituzione fotogrammetrica di una porzione sufficientemente ampia di territorio facendo in modo che fossero presenti, se non tutti, la gran parte dei particolari cartografici restituibili (sono stati esclusi porticati e casi analoghi) e richiesti nei repertori delle entità (abitazioni, strade, ferrovie, recinzione, ecc.) di alcuni CSA scelti come riferimento. Allo scopo è stato utilizzato un restitutore digitale dotato di software Leica Photogrammetric Suite di Leica Geosystems con estensione Pro600.

I dettagli cartografici sono stati suddivisi secondo le regole della codifica gerarchica in sette livelli informativi (gruppi di categorie, si veda ad esempio la Tabella 2), ulteriormente suddivisi in sottocategorie (ad esempio il gruppo delle strade e ferrovie è diviso in strade asfaltate, non asfaltate, in costruzione, ecc.). Per ogni tipologia di entità sono state restituite numerose occorrenze (a seconda della tipologia di entità, da 20 a 50) e, nel corso della restituzione, sono stati giudicati due aspetti sostanziali, rispondendo in modo binario (sì/no) alle domande seguenti:

1. L'entità è visibile e correttamente interpretabile? (fotointerpretazione);
2. L'entità è restituibile in modo metrico ricavando tutte le informazioni dimensionali richieste nel CSA? (possibilità di misura).

Per ogni tipologia di entità si sono contate le risposte affermative alla domanda 1 e alla domanda 2, distinguendo 3 gruppi di risultati:

- A. Particolari cartografici correttamente interpretabili e misurabili (risposte affermative alla domanda 2 > 95%);
- B. Particolari cartografici correttamente interpretabili, ma non restituibili metricamente (risposte affermative alla domanda < 95% e risposte affermative alla domanda 1 > 95%);
- C. Particolari cartografici non visibili o non interpretabili correttamente (risposte affermative alla domanda 1 < 95 %).

I risultati sono pertanto stati raggruppati per categorie al fine di permettere una rappresentazione più sintetica dei risultati.

2.1 ADS40 di Leica Geosystems (Oulx)

Da quanto riportato nella Tabella 2, il blocco fotogrammetrico acquisito dal sensore ADS40 è stato acquisito ad una altezza relativa media molto elevata, ottenendo comunque immagini in cui molti dettagli cartografici al suolo sono ben riconoscibili già ad una prima analisi qualitativa, specialmente nelle immagini a colori.

In base al GSD di questo volo (62 cm), è stato possibile ipotizzare di estrarre, in base alla procedura descritta nel paragrafo precedente (GSD per l'acquisizione indiretta pari a 42 cm), una cartografia numerica in scala nominale 1:10000 restituendo i particolari richiesti nel repertorio del CSA proposto dalla Regione Piemonte per la propria Carta Tecnica Regionale. In figura 1 è possibile osservare una parte della restituzione effettuata e in tabella 3 sono riassunti i risultati ottenuti.

Nel complesso, il volo ADS40 a disposizione presenta caratteristiche idonee per essere impiegato nella cartografia 1:10000, anche se non tutti gli elementi cartografici sono rappresentabili con l'accuratezza necessaria. Ad esempio, i binari ferroviari possono essere facilmente individuati in quanto è ben visibile la massicciata ferroviaria, tuttavia, la loro posizione ed il numero delle "linee" su quest'ultima non sono facilmente comprensibili (Figura 3). Anche le seggiovie possono essere riconosciute dal contesto in cui si trovano; non si può, tuttavia, definire con precisione la loro posizione e ancor meno l'altezza dei piloni (Figura 4), come prescritto nel CSA.

Nel lavoro di restituzione, inoltre, hanno giocato un ruolo fondamentale le immagini a colori. Ad esempio nel descrivere le divisioni del terreno, le sole immagini pancromatiche non sarebbero state sufficienti per distinguere le recinzioni in muratura da quelle realizzate con altri materiali (si veda a tal proposito la Figura 5).

Le immagini del volo ADS40 presentano talvolta toni radiometrici molto saturi, con la conseguenza che la visione stereoscopica risulta in alcuni casi lievemente difficoltosa. Questo problema è stato osservato sia sulle immagini pancromatiche sia su quelle a colori. Tale aspetto è probabilmente da imputarsi all'elevata quota di volo (ben 6000 metri di altezza relativa), non certo favorita dalla presenza di un territorio da acquisire piuttosto accidentato quale la Val di Susa.



Figura 2. Esempio di restituzione sul Paese di Oulx ottenuta dai fotogrammi del volo ADS40

<i>ELEMENTO</i>	<i>Gruppo A</i>	<i>Gruppo B</i>	<i>Gruppo C</i>	<i>NOTE</i>
Strade Ferrovie (9)	8/9	1/0	0/9	Binari - non rappresentabili con precisione
Fabbricati, arredo urbano manufatti tecnici (12)	12/12	0/12	0/12	-
Acque e manufatti inerenti (4)	4/4	0/4	0/4	-
Linee-condotte trasporto energia, materiali, fluidi e persone (6)	5/6	1/6	0/6	Piloni delle seggiovie visibili ma non misurabili
Divisione del terreno (6)	6/6	0/6	0/6	Necessarie immagini colori
Forme terrestri (7)	7/7	0/7	0/7	Necessarie immagini colori
Vegetazione (5)	5/5	0/5	0/5	Necessarie immagini colori
<i>TOTALE sottolivelli</i>	<i>47/49</i>	<i>2/49</i>	<i>0/49</i>	-

Tabella 3. Tabella riassuntiva delle entità restituite sui fotogrammi ADS40 per l'estrazione di cartografia 1:10000

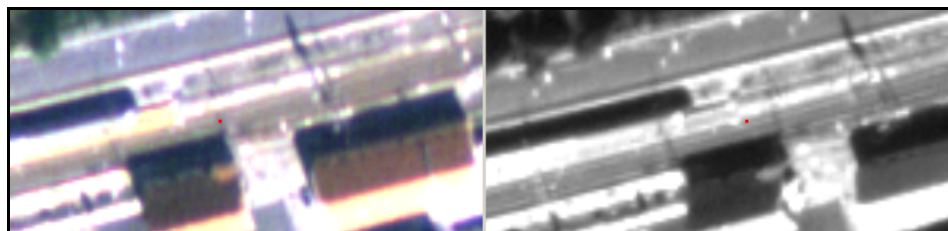


Figura 3. Particolare dei binari ferroviari nel volo ADS40 (zoom 1:1)

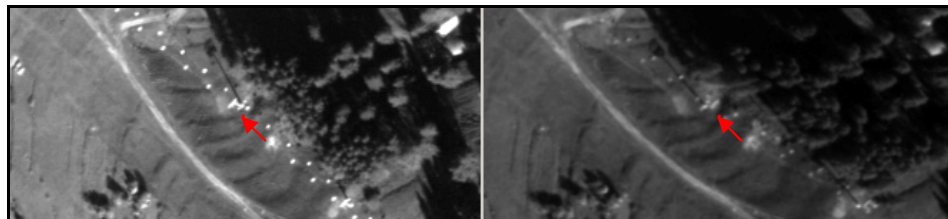


Figura 4. Particolare dei piloni degli impianti sciistici nel volo ADS40 (zoom 1:1)

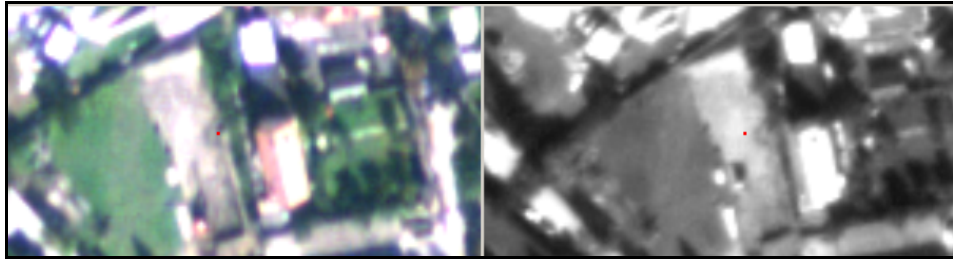


Figura 5. Differenze fra immagini del volo ADS40 a colori e pancromatiche (zoom 1:1)

2.2 UltracamD di Vexcel (Graz)

Questo volo è stato eseguito da una altezza relativa di volo media di 900 m circa, fornendo immagini in cui, in prima analisi, sono distinguibili anche particolari al suolo molto piccoli (sicuramente sub-decimetrici). Il GSD corrisponde a circa 8 cm e pertanto, in base alle considerazioni svolte, è possibile pensare di ricavare informazioni per una cartografia numerica in scala 1:500 (GSD per acquisizione indiretta circa 6 cm). Come nel caso precedente, di seguito viene proposta una tabella riassuntiva (Tabella 4) in cui è presentato quanto è stato restituito sulla base al repertorio delle entità del CSA della Regione Emilia Romagna.

ELEMENTO	Gruppo A	Gruppo B	Gruppo C	NOTE
Strade Ferrovie (12)	12/12	0/12	0/12	-
Fabbricati, arredo urbano manufatti tecnici (17)	17/17	0/17	0/17	-
Acque e manufatti inerenti (4)	4/4	0/4	0/4	-
Linee-condotte trasporto energia, materiali, fluidi e persone (8)	8/8	0/8	0/8	-
Divisione del terreno (7)	7/7	0/7	0/7	-
Forme terrestri (2)	2/2	0/2	0/2	-
Vegetazione (7)	7/7	0/7	0/7	-
TOTALE	57/57	0/57	0/57	-

Tabella 4. Tabella riassuntiva delle entità restituite sui fotogrammi UltraCamD per l'estrazione di cartografia 1:500

Dalla tabella appena proposta si evince come queste immagini soddisfino ampiamente le caratteristiche richieste, permettendo di apprezzare anche i minimi dettagli. Del resto anche osservando semplicemente le immagini (Figura 6) si nota come esse siano estremamente nitide e permettano di mantenere una buona visione (anche stereoscopica) perfino ricorrendo ad ingrandimenti elevati (Figura 6, zoom 4X).

2.3 DMC di Z/I Imaging

Il volo eseguito con questa camera è stato condotto da un'altezza relativa di circa 1200 metri. Una prima analisi qualitativa permette di affermare che la qualità delle immagini a colori è molto buona, ma non sufficiente per consentire la restituzione di tutti i dettagli per una cartografia 1:500. Tutto ciò trova conferma se si considera che il GSD di circa 12 cm corrisponde, secondo le regole

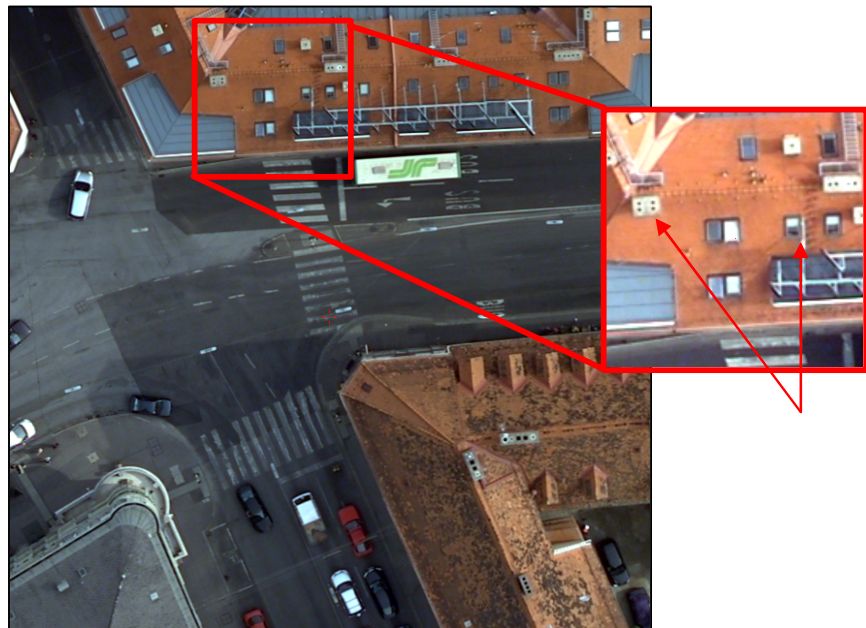


Figura 6. Particolare urbano del Volo UltraCamD (zoom 1:1) e ingrandimento particolari critici da restituire (zoom 4X)

descritte in precedenza, alla scala nominale 1000 (GSD per acquisizione indiretta di 10 cm). A tale scopo, sono stati presi in considerazione gli elementi richiesti nel Repertorio del CSA del Comune di Rivoli (sostanzialmente uno standard in Piemonte). Come di consueto, i risultati ottenuti da questo lavoro sono presentati nella tabella riassuntiva riportata di seguito (Tabella 5).

È importante osservare che in questo volo, come nel precedente, siano ben riconoscibili tutti gli elementi propri della cartografia 1:500. Nonostante ciò, non è stato comunque possibile restituirli per via delle loro dimensioni troppo esigue anche ad ingrandimenti notevoli delle immagini (Figura 7, zoom 4X).

Proprio a questo proposito, è interessante confrontare la qualità delle immagini ottenute nei due voli osservando la Figura 6 (UltraCamD) e la Figura 7 (DMC). Il diverso GSD fra le due immagini appare subito evidente in quanto gli oggetti raffigurati nella Figura 7 risultano chiaramente più piccoli; queste differenze, per quanto minime, inficiano notevolmente sulla precisione nella fase di restituzione di alcuni oggetti (ad esempio gli abbaini o i camini di dimensioni di poco superiori a 0.2-0.3 metri).

ELEMENTO	Gruppo A	Gruppo B	Gruppo C	NOTE
Strade Ferrovie (12)	12/12	0/12	0/12	-
Fabbricati, arredo urbano manufatti tecnici (12)	12/12	0/12	0/12	-
Acque e manufatti inerenti (4)	4/4	0/4	0/4	-
Linee-condotte trasporto energia, materiali, fluidi e persone (6)	6/6	0/6	0/6	-
Divisione del terreno (7)	7/7	0/7	0/7	-
Forme terrestri (6)	6/6	0/6	0/6	-
Vegetazione (7)	7/7	0/7	0/7	-
TOTALE	54/54	0/54	0/54	-

Tabella 5. Tabella riassuntiva delle entità restituite sui fotogrammi DMC per l'estrazione di cartografia 1:1000

3. ANALISI DEI RISULTATI

Una prima analisi di quanto affermato finora consente di affermare che le camere digitali permettono di acquisire immagini con una qualità superiore alla più tradizionale acquisizione indiretta di fotogrammi ripresi con camere analogiche. E' necessario comunque esprimere questo aspetto in termini meno qualitativi [Casella, 2006]. Allo scopo si indichi con GSD_{AI} la dimensione media del pixel a terra nel caso di acquisizione indiretta e con GSD_{CD} la dimensione media del pixel a terra nel caso di camera aerea digitali: a parità di leggibilità, interpretabilità e misurabilità, è possibile affermare che:

$$GSD_{CD} = g GSD_{AI} \text{ con } g \geq 1.$$

indicando con g il guadagno in termini di risoluzione d'acquisizione. Proprio tale parametro deve essere determinato al fine di stabilire regole e norme di utilizzo delle camere digitali.

Scala cartografica	GSD_{AI} [m]	GSD_{CD} [m]	g
1:500	0,064	0.080	1.25
1:1000	0,106	0.120	1.13
1:10000	0,423	0.62	1.46

Tabella 6. I valori di guadagno di risoluzione per i voli disponibili



Figura 7. Particolare urbano volo Intergraph Z/I (zoom 1:1) e ingrandimento particolari critici da restituire (zoom 4x)

In base alla tabella 1 e alle verifiche effettuate, è possibile determinare empiricamente il valore del guadagno di risoluzione nei 3 casi analizzati (tabella 6): il valore di g risulta compreso tra 1.1 e 1.5 con valore medio pari a circa 1.3. Il valore massimo $g = 1.5$ è stato ottenuto con il volo ADS40 su Oulx (TO). Tale valore determina comunque il limite estremo per la risoluzione utilizzabile alla scala 1:10000 poiché alcuni dettagli non sono correttamente interpretabili: potrebbe essere pertanto considerato come valore massimo del parametro g .

Scale I:	Acquisizione indiretta				GSD [m]	ADS 40			UltracamD			DMC		
	GSD [m]	SM I:	H [m]	L [m]		SM I:	H [m]	L [m]	SM I:	H [m]	L [m]	SM I:	H [m]	L [m]
500	0.06	3000	450	690	0.09	13500	850	1050	9850	1000	1020	7500	900	1240
1000	0.11	5000	750	1120	0.15	23100	1450	1800	16750	1700	1730	12500	1500	2070
2000	0.17	8000	1200	1840	0.24	36650	2300	28500	2700	26600	2750	20000	2400	3310
5000	0.32	15000	2250	3450	0.45	69300	4350	5400	5100	50250	5200	37500	4500	6220
10000	0.42	20000	3000	4600	0.60	92400	5800	7200	6800	67050	6900	50400	6050	8360

Tabella 7. Ipotesi di lavoro sulle caratteristiche del volo per cartografia a varie scale per le 3 camere analizzate

In sintesi, questo significa che, potenzialmente, la dimensione media del pixel a terra se si usano camere digitali può essere anche il 50% (almeno il 13%, mediamente il 30%) più grande rispetto all'acquisizione indiretta usata fin d'ora. Quest'affermazione deve essere considerata con la giusta approssimazione in quanto deriva da analisi empiriche su dati di varia natura e non tiene in considerazione le questioni più propriamente metriche legate alle precisioni di rappresentazione degli oggetti. Infatti, in particolare a grandissima scala (1:500) le precisioni da raggiungere sono particolarmente restrittive rispetto agli aspetti semantici i quali tendono invece a divenire predominanti a scale più piccole (1:10000). Da queste considerazioni è comunque lecito stabilire un'ipotesi di lavoro da cui partire in futuro per analisi più dettagliate da eseguire magari con un insieme di dati ad hoc per ciascuna camera. Secondo questa ipotesi è quindi possibile definire i parametri di volo (opportunosamente approssimati) delle 3 camere analizzate per la produzione di cartografia alle varie scale nominali (tabella 7). Dalla questa tabella si noti che:

- i valori di SM (scala media), H (altezza relativa di volo) e L (abbracciamento trasversale) per le camere digitali sono molto

- differenti rispetto ai ben noti valori utilizzati con camere analogiche;
- le altezze relative di volo per le camere digitali sono, in generale, sempre maggiori rispetto a quelle utilizzate per le camere analogiche permettendo un abbracciamento maggiore e quindi un risparmio in termini economici (minori strisciate);
- a parità di GSD, le 3 camere testate hanno caratteristiche dei voli decisamente differenti che non permettono di stabilire regole generali in termini di scala media e altezza relativa di volo.

4. CONCLUSIONI

Dal punto di vista semantico anche le camere digitali si sono dimostrate idonee alla produzione di cartografia numerica a media, grande e grandissima scala analogamente all'acquisizione indiretta mediante camere fotogrammetriche analogiche montate su piattaforma aerea: in base ad una data scala cartografica, vista la varietà di geometria delle camere digitali analizzate, solo la dimensione media del pixel a terra (GSD) può essere considerata come parametro guida nella scelta dei parametri di acquisizione di un volo fotogrammetrico puramente digitale. Rispetto ai dati ottenuti fino ad oggi con camere analogiche e acquisizione indiretta, le camere digitali garantiscono una migliore qualità delle immagini ottenute (miglior leggibilità dei dettagli cartografici), permettendo di utilizzare un GSD maggiore (dal 10% al 50% più grande). Tale affermazione può essere considerata una buona ipotesi di lavoro da cui partire per nuove analisi che stabiliscano con maggior precisione il parametro di guadagno di risoluzione, mediante gruppi di acquisizioni fatte con la stessa camera, sulla stessa zona, ad altezze relative di volo differenti. Le considerazioni effettuate possono essere ancora generalizzate affrontando analoghe operazioni di verifica per altre camere digitali (DIMAC di Dimac System, UltracamX di Vexcel, ADS 40 di II generazione di Leica Geosystem ecc.).

5. RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato finanziato nell'ambito del Progetto di Ricerca di rilevanza Nazionale PRIN 2005 "Utilizzo e interpretazione di immagini digitali ad alta risoluzione acquisite da piattaforma aerea o satellitare per applicazioni cartografiche ambientali" (Resp. Naz. Prof. S. Dequal – Politecnico di Torino, DITAG).

Si ringraziano, inoltre, le ditte C.G.R. per gli esempi acquisiti con camera ADS40 di Leica Geosystem, Geoworks s.a.s. per la fornitura dell'esempio acquisito con camera DMC di Z/I e Geotop per l'esempio UltracamD.

6. BIBLIOGRAFIA

- Giulio Tonolo F., Nex F., Perez F., Piras M., 2007. 3D map production using an Orbview3 stereo-pair. In: *Proceedings of EARSEL 2007* Bolzano
- Casella V., 2006. Le camere digitali per la fotogrammetria aerea: aspetti analitici e potenzialità applicative. In: *Atti della X Conferenza ASITA*, Bolzano, Italia, 14-17 novembre 2006, vol. 1
- Piero Boccardo, Enrico Borgogno Mondino, Giuliano Comoglio, Fabio Giulio Tonolo, (2005), "Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per aggiornamento cartografico a media scala", IX Conferenza Nazionale ASITA, Catania (Italia), Novembre 2005, ISBN8890094397, pp. 389-394
- Cramer M., 2006. The ADS40 Vaihingen/Enz geometric performance test. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 60, Issue 6, September 2006, pp. 363-374
- Jacobsen, K., 2006. Understanding Geo-Information from High Resolution Optical Satellites. In: *GIS Development Asia Pacific* (2006), pagg. 24-28
- Cramer M., 2005. 10 years ifp test site Vaihingen/Enz: an independent performance study. In: *Photogrammetric Week 2005*, ed. D. Fritsch/R.Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg, pagg. 79-92
- Leberl F., Gruber M.. ULTRACAM-D: Understanding some Noteworthy Capabilities. In: *Photogrammetric Week 2005*, ed. D. Fritsch/R.Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg, pagg. 57-68
- Kölbl O., 2005. Transfer functions in image data collection. In: *Photogrammetric Week 2005*, ed. D. Fritsch/R.Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg, pagg. 93-104
- Neumann K. J., 2004. Operational aspect of digital aerial mapping cameras. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Turchia, vol. XXXV, part. B1, pagg. 222-225
- Galetto R., 2004. Camere digitali per riprese aeree e terrestri. In: *Bollettino SIFET*, n. 4, pagine 45-85
- Casella V., Bianchini G., 2004. Verifica delle qualità metriche della camera Leica ADS40. In: *Atti della VIII Conferenza ASITA*, Roma, Italia, 14-17 dicembre 2004, vol. 2, pagg. 1983-1988.
- Reulke R., 2003. Film-based and Digital Sensors – Augmentation or Change in Paradigm?. In: *Photogrammetric Week 2003*, ed. D. Fritsch/R.Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg, pagg. 41-52
- Leberl F., Gruber M., Ponticelli M., Bernoegger S., Perko R, 2003. The Ultracam large format aerial digital camera system. In: *Proceeding of the American Society for Photogrammetry & Remote Sensing*, Anchorage, Alaska, 5-9 Maggio
- Heier H., Dorstel C., Hinz A., 2001. DMC – The digital sensor technology of Z/I Imaging. In: *Photogrammetric Week 2001*, ed. D. Fritsch/R.Spiller, Wichmann, Heidelberg, pagg. 93-103
- Fricker P., 2001. ADS40 – Progress in digital aerial data collection . In: *Photogrammetric Week 2001*, ed. D. Fritsch/R.Spiller, Wichmann, Heidelberg, pagg. 105-116
- Dequal S., Lingua A., Rinaudo F., 2001. Ortofoto digitale di precisione. In: *Bollettino Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia*, Supplemento speciale al n. 2
- Baltavias E., 1999. On the performance of photogrammetric scanners. . In: *Photogrammetric Week 1999*, ed. D. Fritsch/R.Spiller, Wichmann, Heidelberg, pagg. 155-173
- Kraus K. (trad Dequal S.), 1994. Fotogrammetria – Vol. I. Levrotto & Bella, Torino