



ORTOIMMAGINI 10K E MODELLI ALTIMETRICI



Francesco Cilloccu
Sergio Dequal
Maria Brovelli
Mattia Crespi
Andrea Lingua

CISIS

**Centro Interregionale di Coordinamento e documentazione
per le informazioni territoriali**

I GENERALITA'

I.1 INDICE

I	GENERALITÀ	3
I.1	INDICE	5
I.2	PREFAZIONE	9
I.3	IL GRUPPO DI LAVORO	10
II	MODELLI ALTIMETRICI	13
II.1	SPECIFICHE TECNICHE GENERALI	15
II.1.1	<i>Funzione dei modelli altimetrici</i>	15
II.1.2	<i>Tipologie principali e contenuti</i>	15
II.1.3	<i>Il seminato di punti</i>	16
II.1.4	<i>Sistema di riferimento</i>	17
II.1.5	<i>Requisiti di qualità dei modelli altimetrici</i>	19
II.1.6	<i>Il formato dei dati</i>	23
II.1.7	<i>Dati vettoriali</i>	27
II.1.8	<i>Data del rilievo</i>	27
II.1.9	<i>Livelli di Precisione dei modelli altimetrici</i>	27
II.1.9.1	Specifiche per il livello 0	28
II.1.9.2	Specifiche per il livello 1	29
II.1.9.3	Specifiche per il livello 2	29
II.1.9.4	Specifiche per il livello 3	30
II.1.9.5	Specifiche per il livello 4	31
II.1.9.6	Specifiche per il livello 5	31
II.1.9.7	Specifiche per il livello 6	32
II.1.9.8	Specifiche per il livello 7	33
II.1.9.9	Specifiche per il livello 8	33
II.1.10	<i>Le verifiche di qualità</i>	34
II.1.10.1	Le verifiche di qualità interna	34
II.1.10.1.1	Il controllo di densità e completezza	34
II.1.10.1.2	Controllo dell'assenza di blunders	34
II.1.10.2	Le verifiche di qualità sul prodotto finale	35
II.1.10.2.1	La verifica degli errori sistematici	35
II.1.10.2.2	La verifica globale	36
II.1.10.2.3	La verifica delle <i>breakline</i>	36
II.2	PRESCRIZIONI PER L'USO DI CARTOGRAFIA NUMERICA PRE-ESISTENTE	39
II.2.1	<i>Introduzione</i>	39
II.2.2	<i>Caratteristiche della carta numerica utilizzata</i>	40
II.2.3	<i>La verifica preliminare del livello di aggiornamento</i>	40
II.2.4	<i>L'acquisizione dati per i modelli altimetrici da cartografia numerica esistente</i>	41
II.2.5	<i>Il controllo di qualità</i>	43
II.3	PRESCRIZIONI PER L'UTILIZZO DELLE TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE	45
II.3.1	<i>Generalità sull'impiego della fotogrammetria</i>	45
II.3.2	<i>L'acquisizione dei dati per i modelli altimetrici</i>	45
II.3.2.3.1	Caratteristiche dei velivoli	47
II.3.2.3.2	Caratteristiche delle camere da presa	47
II.3.2.3.3	Caratteristiche dei voli	48
II.3.2.3.4	Epoca dei voli	49
II.3.2.3.5	Piano di volo	49

II.3.2.3.6	Approntamento delle immagini in forma digitale	50
II.3.2.3.7	Materiale da consegnare al termine del volo	50
II.3.2.5.1	Generazione automatica del modello altimetrico:	51
II.3.2.5.2	Restituzione fotogrammetrica manuale	52
II.3.3	<i>Il controllo di qualità</i>	53
II.3.3.1.1	Il controllo di qualità interna	54
II.3.3.1.2	Il collaudo del volo	54
II.3.3.1.3	Collaudo della digitalizzazione dei fotogrammi (eventuale)	55
II.4	PRESCRIZIONI PER L'UTILIZZO DI TECNICHE LIDAR	57
II.4.1	<i>Descrizione del sistema e modalità operative</i>	57
II.4.2	<i>Caratteristiche generali dell'acquisizione dati</i>	57
II.4.3	<i>Elaborazione dei dati primari</i>	63
II.4.3.1	Definizione delle quote ortometriche	63
II.4.3.3	Dati elaborati e prodotti finali di consegna	64
II.4.4	<i>Il controllo di qualità</i>	64
II.4.4.1.1	La verifica del volo	64
II.4.4.1.2	La verifica dell'elaborazione dei dati	65
II.5	PRESCRIZIONI PER L'UTILIZZO DI TECNICHE SATELLITARI	67
II.5.1	<i>Prescrizioni per l'uso del DSM SRTM</i>	67
II.5.1.4	CGIAR-CSI SRTM	69
II.5.2	<i>Prescrizioni per l'uso di DSM ASTER</i>	71
II.5.3	<i>Prescrizione per l'utilizzo di immagini satellitari ad alta e altissima risoluzione</i>	74
II.5.3.1	Acquisizione del dato	74
II.5.3.2	Descrizione del processo di generazione del DSM	74
II.5.3.3	Dati ausiliari necessari	75
II.5.3.6	Qualità dei DSM da immagini satellitari ad alta e altissima risoluzione	77
II.5.4	<i>La verifica di qualità</i>	78
III	ORTOFOTO DIGITALI 10K	79
III.1	SPECIFICHE TECNICHE GENERALI	81
III.1.1	<i>Sistema di riferimento</i>	81
III.1.2	<i>Taglio dei fogli</i>	81
III.1.3	<i>Prototipo di stampa dei fogli</i>	82
III.1.4	<i>Tolleranza planimetrica</i>	84
III.1.5	<i>Risoluzione geometrica</i>	86
III.1.6	<i>Risoluzione radiometrica</i>	86
III.1.7	<i>Formato dei dati digitali</i>	87
III.1.8	<i>Data del rilievo</i>	87
III.1.9	<i>Metadati</i>	87
III.1.10	<i>Produzione delle ortofoto digitali</i>	88
III.1.10.1	Requisiti delle immagini primarie	88
III.1.10.2	Acquisizione indiretta mediante scansione di immagini analogiche	88
III.1.10.3	Il modello altimetrico	89
III.1.10.4	Punti d'appoggio (GCP) e di controllo (CP)	89
III.1.10.5	Orientamento esterno delle immagini digitali primarie	90
III.1.10.6	Generazione dell'ortofoto e mosaicatura	90
III.1.11	<i>Verifiche di qualità</i>	91
III.1.11.1	Le verifiche di qualità interna	91
III.1.11.1.1	Verifica dei requisiti delle immagini di partenza	91
III.1.11.1.2	Verifica della procedura di scansione	92
III.1.11.1.3	Verifica di precisione su punti di controllo	92
III.1.11.1.4	Verifica della corrispondenza del modello altimetrico	92
III.1.11.2	Le verifiche di qualità sul prodotto finale	92
III.2	PRESCRIZIONI PER LA RIPRESA FOTOGRAMMETRICA	95
III.2.1	<i>Il volo fotogrammetrico</i>	95

III.2.1.1	Caratteristiche del volo	95
III.2.1.2	Caratteristiche dei velivoli	95
III.2.1.3	Caratteristiche delle camere da presa	96
III.2.1.4	Caratteristiche dei voli	96
III.2.1.5	Epoca dei voli	97
III.2.1.6	Piano di volo	97
III.2.2	<i>Utilizzo di tecniche di fotogrammetria diretta</i>	97
III.2.2.1	La strumentazione GNSS a bordo e relative misure	97
III.2.2.2	I sistemi inerziali	98
III.2.2.3	Le stazioni a terra	99
III.2.3	<i>Materiale da consegnare al termine del volo</i>	99
III.2.4	<i>Il controllo di qualità</i>	99
III.2.4.1	Il controllo della strumentazione	100
III.2.4.2	Il controllo di qualità interna	100
III.2.4.2.1	Il collaudo del volo	100
III.2.4.2.2	Le misure GNSS per la determinazione dei centri di presa	101
III.2.4.2.3	La georeferenziazione diretta	101
III.3	PRESCRIZIONI PER L'UTILIZZO DI IMMAGINI SATELLITARI AD ALTA RISOLUZIONE	103
III.3.1	<i>L'acquisizione del dato</i>	103
III.3.2	<i>Descrizione del processo di ortorettifica</i>	103
III.3.2.1	Funzioni razionali mediante RPC	103
III.3.2.2	Modello rigoroso	104
III.3.3	<i>Dati ausiliari necessari</i>	104
III.3.3.1	Caratteristiche del modello altimetrico per l'ortorettifica	104
III.3.3.2	Caratteristiche dei Ground Control Points (GCP)	106
III.3.4	<i>Validazione del prodotto</i>	106
III.3.4.1	Caratteristiche dei Check Points (CP)	106
III.3.4.2	Metodi di validazione supplementari	106
IV	CARATTERISTICHE DEI SENSORI ATTUALI	107
IV.1	CAMERE DIGITALI ATTUALI E RELATIVI PRODOTTI OTTENIBILI	109
IV.1.1	<i>Le camere digitali</i>	109
IV.1.1.1	I sensori	109
IV.1.1.2	Il principio di funzionamento di una camera digitale	112
IV.1.1.3	Le camere fotogrammetriche digitali per piattaforma aerea	113
IV.1.2	<i>Camere frame</i>	115
IV.1.2.1	DMC (Digital Mapping Camera) di Z/I	115
IV.1.2.2	ULTRACAM di Vexcel Microsoft	117
IV.1.2.3	DiMAC (Digital Modular Aerial Camera)	120
IV.1.2.4	Digital Sensor System (DSS) di Applanix	121
IV.1.3	<i>Camere push broOm</i>	122
IV.1.3.1	ADS 40 (I e II generazione) e ADS 80 di Leica Geosystems	122
IV.1.3.2	3-DAS-1 e 3-DAS-2 Werhli Associates/Geosystem	125
IV.1.3.3	JAS 150s di Jena Optronics	127
IV.1.4	CONCLUSIONI	128
IV.2	SATELLITI ATTUALI E RELATIVI PRODOTTI DISPONIBILI	129
IV.2.1	<i>GeoEye Inc. (USA)</i>	129
IV.2.1.1	IKONOS	129
IV.2.1.2	Orbview-3	130
IV.2.1.3	GeoEye-1 (previsto)	130
IV.2.2	<i>DigitalGlobe Inc. (USA)</i>	130
IV.2.2.1	QuickBird	130
IV.2.2.2	WorldView-1	130
IV.2.2.3	WorldView-2 (previsto)	131
IV.2.3	<i>ImageSat International N.V. (Israele)</i>	131
IV.2.3.1	EROS-B	131

IV.2.3.2	EROS-C (previsto)	131
IV.2.4	NRSA (India)	131
IV.2.4.1	Cartosat-2	131
IV.2.5	Spot Image S.A. (Francia)	132
IV.2.5.1	KOMPSAT-2	132
V	TIPOLOGIE, GLOSSARIO, ACRONIMI	133
V.1	TIPOLOGIE DEI MODELLI ALTIMETRICI E CONTENUTI	135
V.1.1.1	DTM (Digital Terrain Model) o DEM (Digital Elevation Model)	135
V.1.1.2	DSM (Digital Surface Model)	135
V.1.1.3	DDTM (Dense Digital Terrain Model) o DDEM (Dense Digital Elevation Model)	135
V.1.1.4	DDSM (Dense Digital Surface Model)	135
V.1.1.5	TIN (Triangulated Irregular Network)	136
V.2	TIPOLOGIE DI ORTOFOTO	137
V.2.1	In funzione dell'utilizzo	137
V.2.2	In funzione del contenuto	137
V.2.2.1	B/N o pancromatico	137
V.2.2.2	A colori (RGB, True color)	137
V.2.2.3	Falso colore	137
V.2.2.4	Multispettrale, Iperspettrale	138
V.2.3	In funzione della precisione	138
V.2.3.1	Speditiva	138
V.2.3.2	Ordinaria	139
V.2.3.3	Di precisione	139
V.3	TERMINOLOGIA	141
V.3.1.1	Altezza ellissoidica, quota ortometrica e ondulazione del geoide	141
V.3.1.2	Interpolazione	142
V.3.1.3	Precisione, accuratezza e tolleranza	142
V.3.1.4	Errori grossolani	145
V.3.1.5	Carta dei tetti	146
V.3.1.6	Scala nominale	146
V.3.1.7	Metadati	146
V.3.1.8	Rapporto di compressione	147
V.3.1.9	Compressione lossy	147
V.3.1.10	Compressione lossless	147
V.3.1.11	File di georeferenziazione di immagini digitali (TFW, JGW, BPW, ̃)	147
V.4	ACRONIMI	148
VI	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	149
VI.1	RIFERIMENTI NORMATIVI	151
VI.2	BIBLIOGRAFIA	152
VI.2.1	Libri	152
VI.2.2	Articoli	152
VI.2.3	Siti Internet	154

I.2 PREFAZIONE

Il presente documento si inserisce nell'ambito di un progetto di ricerca del Centro Interregionale di Coordinamento e documentazione per le informazioni territoriali e consiste nella stesura delle specifiche tecniche %ortoimmagini 10k e DTM+. Esso si applica all'attività %Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali+ previsto dall'art. 59 del Codice dell'Amministrazione Digitale e ha lo scopo di integrare o sostituire i 5 documenti prodotti dal Comitato Nazionale per l'Informatizzazione della Pubblica Amministrazione (CNIPA, inerenti la produzione di ortofoto alla scala nominale 1:10000 citati in bibliografia.

Il progetto Lotto 3 %Specifiche tecniche ortoimmagini e DTM+ aggiorna le norme esistenti definendo, con le nuove specifiche, uno strumento operativo per la produzione di dati territoriali.

Il gruppo di lavoro è costituito da

- Proff. Sergio Dequal e Andrea Lingua, Politecnico di Torino,
- Prof.ssa M. Brovelli, Politecnico di Milano, Polo Regional e di Como
- Prof. M. Crespi, Università la Sapienza, Roma,
- Arch. F. Cilloccu, Regione Autonoma della Sardegna (referente del Centro Interregionale ò .)

Collaboratori:

- Dott. E. Realini, Politecnico di Milano

Enti, Istituzioni e Agenzie pubbliche necessitano spesso, per ottemperare ai propri scopi istituzionali, di produrre e utilizzare ortofoto digitali.

Il progetto di ricerca si colloca nell'ambito della crescente domanda d'informazione geografica strettamente connessa alla gestione del territorio, avvalendosi anche delle moderne tecnologie (Internet, Web), il cui concetto chiave è l'interoperabilità di dati e servizi disponibili in rete, favoriti dalla sempre più moderna realizzazione di infrastrutture tecnologiche condivise.

In tal senso le specifiche tecniche contribuiscono a definire uno strumento di lavoro per la produzione di dati geografici secondo standard di riferimento nazionali e internazionali (norme ISO comitato tecnico 211).

Vengono considerate , inoltre, norme più intrinsecamente legate ai processi e metodi di produzione relativi allo stato attuale dell'arte. Tali prescrizioni dovranno essere predisposte e mantenute in continuo aggiornamento sulla base delle evoluzioni tecnologiche cui sono soggette le differenti fasi di processo che compongono la produzioni dell'ortofoto digitale e dei modelli altimetrici.

In particolare, il presente documento ha come obiettivo la definizione degli standard di riferimento per la produzione di modelli altimetrici e ortofoto alla scala nominale 1:10000, provenienti da dati acquisiti da piattaforma aerea o satellitare.

I.3 IL GRUPPO DI LAVORO

Francesco
CILLOCCU



(Responsabile)

Francesco Cilloccu è nato a Cagliari nel 1957. Si è laureato presso la facoltà di Architettura di Firenze dove ha collaborato e partecipato a progetti di ricerca nel campo dell'architettura e del design, realizzando di seguito diversi lavori da libero professionista.

Dal 1995 risiede in Sardegna e lavora presso il Servizio informativo e cartografico della Regione Autonoma della Sardegna dove ha assunto l'incarico di responsabile del settore della cartografia regionale; attualmente è direttore del Servizio del Governo del territorio e della tutela paesaggistica.

Nell'ambito istituzionale si è occupato della produzione di dati geografici digitali della Sardegna e di sistemi informativi territoriali regionali e nazionali, dedicandosi alla definizione di studi e strategie per la gestione dell'informazione geografica nel servizio pubblico.

Ha curato la progettazione e la direzione di lavori di cartografie in formato Gis e di immagini satellitari, realizzando il database "GeoDb10K" ad estensione regionale, derivato dalla Carta tecnica regionale secondo le specifiche dell'IntesaGis.

È responsabile del progetto per la realizzazione delle specifiche tecniche nazionali per la produzione di modelli altimetrici e ortofoto digitali alla scala nominale 1:10.000, per il Centro interregionale per i sistemi informatici, geografici e statistici (CISIS).

Professore ordinario di Topografia e Fotogrammetria al Politecnico di Torino dal 1975. Autore di oltre 100 articoli su riviste nazionali e internazionali.

Presidente della Commissione "Large Scale Mapping" dell'European Organization for Experimental Photogrammetric Research

Coordinatore del test OEEPE "Comparison of national guidelines for technical and cadastral mapping in Europe", dal 1991 al 1998.

Presidente del Consiglio Scientifico della Società Italiana di Topografia e Fotogrammetria e reporter italiano per la Commissione "Mapping and Geographic Information Systems" dell'ISPRS (International Society of Photogrammetry and Remote Sensing), dal 1994 al 1998.

Presidente del Consiglio Scientifico dell'ASITA (Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali) dal 1996 al 1999.

Presidente del Collegio dei Direttori di Dipartimento del Politecnico di Torino, per il quadriennio 1999-2003. Direttore del Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie dal 1998 al 2007. Coordinatore del Dottorato di Ricerca in Ambiente e Territorio del Politecnico di Torino dal 2005.

Vicepresidente di ITHACA e presidente del suo Consiglio Scientifico.

Sergio
DEQUAL



(Coordinatore)

Maria Antonia
BROVELLI



Diploma di maturità classica, laurea in fisica, dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche, Maria Antonia Brovelli è attualmente professoressa di Cartografia Numerica e Geographic Information Systems presso il Politecnico di Milano e insegna GIS 3 presso il Politecnico Federale di Zurigo. E' inoltre docente presso il Master Universitario Internazionale di II livello "Il Polismaker per la gestione della trasformazione degli insediamenti urbani".

E' responsabile scientifico del Laboratorio di Geomatica, sito presso il Polo di Como del Politecnico di Milano e membro del comitato scientifico della Sifet, del comitato redazionale della rivista Applied Geomatics e del comitato Education and Curriculum di OSGeo (Open Source Geospatial Foundation). E' autrice di 120 pubblicazioni, di cui 57 a livello internazionale (5 ISI) e 63 a livello nazionale.

Si occupa di tematiche inerenti la Geodesia e la Geomatica ad ampio spettro: geodesia fisica (stima del geoide e della superficie topografica marina), trattamento di dati acquisiti con nuove tecnologie (LiDAR e immagini ad alta risoluzione), cartografia numerica e sistemi informativi territoriali (progettazione, sviluppo di metodi per il trattamento di osservazioni ambientali, database con estensioni spaziali ai webGIS, geoservizi, mobile e context-aware GIS).

Laurea con lode in Ingegneria Civile - sezione Trasporti, dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche, Mattia Giovanni CRESPI è attualmente Professore ordinario del Settore scientifico-disciplinare ICAR 06 - Topografia e Cartografia presso la Facoltà di Ingegneria della Sapienza Università di Roma.

E' anche Presidente del Consiglio d'Area in Ingegneria Ambientale e Coordinatore del Dottorato di Ricerca in Infrastrutture e Trasporti.

Autore di oltre 140 pubblicazioni su riviste e atti di congressi nazionali e internazionali, ha svolto le attività di ricerca sui seguenti argomenti: problemi di calcolo in geodesia e fotogrammetria, campagne di misura e analisi dati GPS, progetto, compensazione e analisi di reti terrestri, GPS e miste, modellizzazione e controllo delle deformazioni, progetto, compensazione e analisi di blocchi fotogrammetrici, modellizzazione digitale del terreno, applicazione meteorologica del GPS, reti GNSS permanenti per servizi di posizionamento e navigazione (real-time e post-processing), elaborazione di immagini satellitari ad alta risoluzione per uso cartografico e per la modellizzazione digitale del terreno, utilizzo di tecniche di geodesia spaziale per la geodinamica globale.

**Mattia Giovanni
CRESPI**



**Andrea Maria
LINGUA**



Laurea in Ingegneria Civile (1994), dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche (1998), Andrea Maria LINGUA è professore associato dal 2006 presso il Politecnico di Torino. E' docente dei corsi di Cartografia numerica e GIS, Topografia I, Topografia e cartografia, Fotogrammetria, Fotogrammetria Applicata per le lauree in Ingegneria Edile e Ingegneria Civile.

E' presidente della società S.I.R. (Soluzioni Innovative per il Rilievo), spin-off del Politecnico di Torino. Autore di oltre 80 pubblicazioni su riviste internazionali (35) e nazionali.

Partecipa a numerosi progetti di rilevanza nazionale inerenti i modelli altimetrici, la fotogrammetria digitale (algoritmi e ortofoto di precisione), LiDAR (algoritmi di orientamento e elaborazione dei dati primari e integrazione con fotogrammetria) la fotogrammetria diretta, le tecniche di posizionamento GNSS di precisione e a vari contratti di consulenza e ricerca con enti territoriali e industrie (Nikon Instruments, Leica, Fiocchi Munizioni, ...). Attualmente, si occupa di ricerche legate alla fotogrammetria digitale (algoritmi di automazione, operatori d'interesse ..), LiDAR (applicazioni industriali), Mapping Mobile System a basso costo e WebGIS con strumenti *open source*.

II MODELLI ALTIMETRICI

II.1 SPECIFICHE TECNICHE GENERALI

II.1.1 FUNZIONE DEI MODELLI ALTIMETRICI

Per definizione un modello altimetrico è un insieme di dati che permette il calcolo per interpolazione della quota di un punto arbitrario del terreno (o della superficie) che viene descritto con una precisione assegnata.

I modelli altimetrici rappresentano, nei confronti delle tradizionali curve di livello, un'alternativa alla descrizione dell'altimetria del terreno cartografato, che presenta vantaggi e svantaggi. È innegabile che le curve di livello costituiscano una rappresentazione, sovrapponibile alla planimetria, molto efficace non solo nel fornire precise informazioni di quota lungo le linee stesse, ma anche nel descrivere complessivamente la morfologia del terreno (terreno liscio: linee rade e con debole curvatura; terreno accidentato: linee fitte e con forte curvatura). I modelli altimetrici, invece, sono in grado di fornire una descrizione visiva della morfologia solo se si disegna in assonometria (o prospettiva) il grigliato che essi definiscono, e non sono pertanto sovrapponibili alla planimetria.

Le curve di livello sono quindi destinate principalmente alla visualizzazione del terreno, mentre i dati relativi a un modello altimetrico sono atti a fornire informazioni di quota sul territorio rappresentato, anche con tutti gli oggetti che su di esso sono costruiti, ma esclusivamente in un formato adatto al trattamento numerico con calcolatore.

Esistono numerosi *software* in grado di trasformare un tipo di rappresentazione nell'altro, con inevitabile decadimento di precisione delle informazioni originali, decadimento che tuttavia può essere contenuto in limiti accettabili purché la densità delle curve di livello (o dei punti del modello altimetrico integrati con *breakline*) sia sufficiente. In molti casi, in particolare quando si disponga di modelli altimetrici *densi*, le curve di livello derivabili sono praticamente identiche a quelle disegnate direttamente da un restituitista fotogrammetrico.

II.1.2 TIPOLOGIE PRINCIPALI E CONTENUTI

Come descritto nel glossario e visibile in Figura 1, i modelli altimetrici del terreno possono essere classificati in funzione del contenuto:

- A. Modelli digitali di quota (*Digital Elevation Model*, DEM), in cui si descrive la superficie del terreno; tali modelli possono essere indicati anche con il termine modelli digitali del terreno (*Digital Terrain Model*, DTM);
- B. modelli digitali di superficie (*Digital Surface Model*, DSM) in cui si descrive la superficie fisica del territorio, compresi gli edifici, le strutture artificiali che su di esso sono presenti, gli alberi e tutti gli oggetti presenti sul territorio;

I dati necessari per descrivere un modello altimetrico sono costituiti da:

1. un *seminato di punti* disposti in modo regolare o irregolare;
2. le *linee caratteristiche* del terreno (DTM), degli edifici e della superficie descritta (DSM) che vengono descritti linee di rottura (o di discontinuità): *breakline*, ovvero linee che uniscono i punti della superficie descritta caratterizzati da brusche variazioni di pendenza;

3. le linee e i punti di descrizione di *elementi corografici* come le creste, gli impluvi, le vette e quant'altro;
4. le delimitazioni di aree non incluse nei modelli altimetrici, le cosiddette *zone morte*;
5. i limiti dell'area rappresentata.

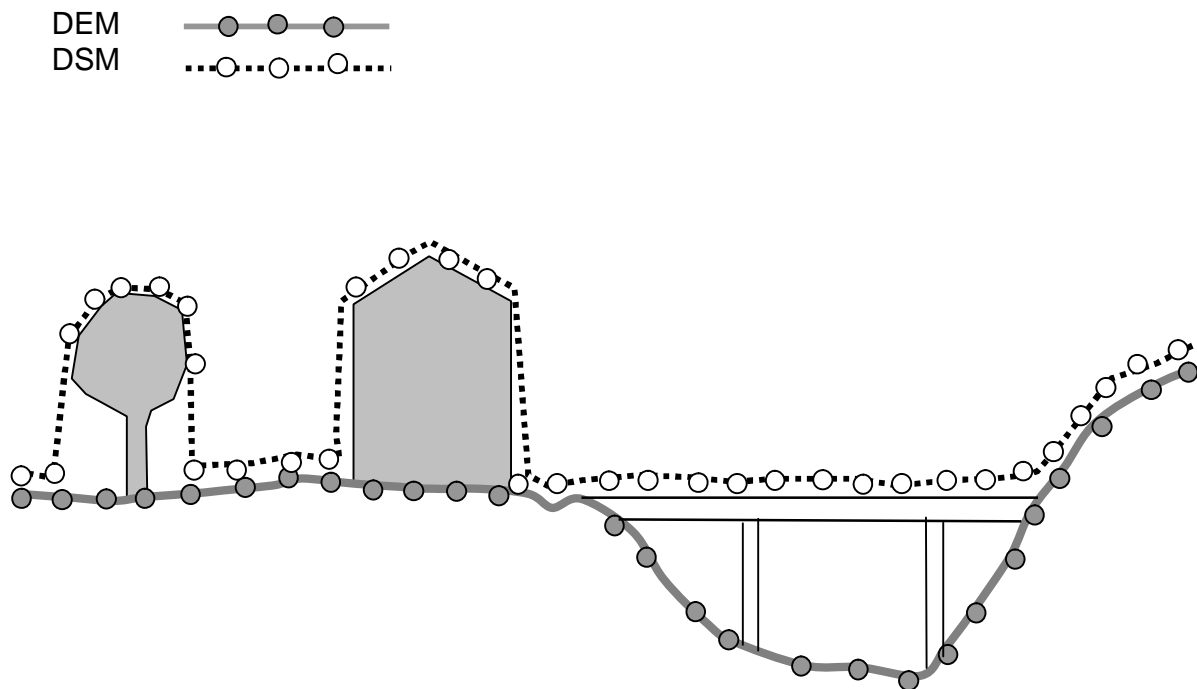


Figura 1 - DEM e DSM

Qualora si raggiunga una densità sufficiente dei punti di tipo 1 (modelli altimetrici densi) che permetta di descrivere la superficie del territorio in modo corretto e completo, è possibile semplificare i tipi di dati contenuti nei modelli altimetrici: in questo caso, infatti, non è necessario descrivere direttamente le discontinuità e i dettagli corografici che vengono correttamente descritti grazie all'elevata densità dei punti costituenti il modello altimetrico. Si definiscono in analogia con le tipologie elencate in precedenza:

- A. il modello digitale denso di elevazione (*Dense Digital Elevation Model*, DDEM) detto anche modello digitale denso del terreno (*Dense Digital Terrain Model*, DDTM);
- B. il modello digitale denso di superficie (*Dense Digital Surface Model*, DDSM);

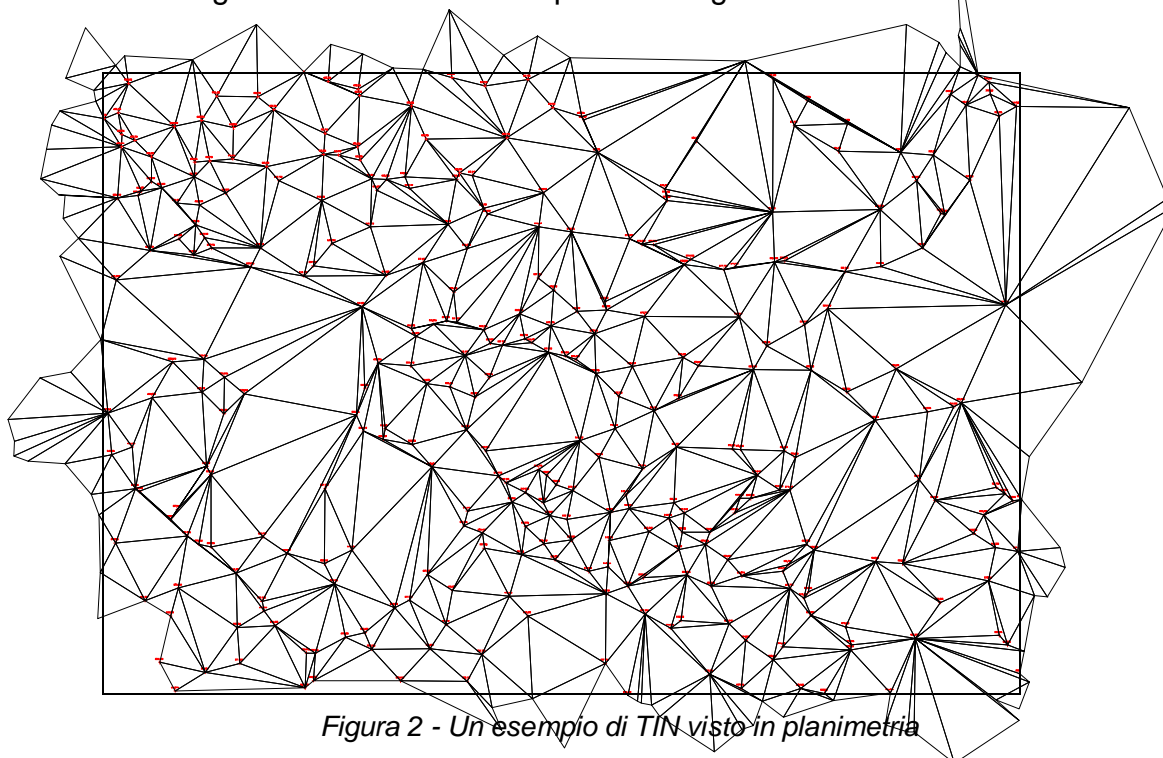
Non si può trascurare, anche nel caso dei modelli densi, la definizione delle linee di delimitazione delle *zone morte* e di descrizione dei limiti dell'area rappresentata.

II.1.3 IL SEMINATO DI PUNTI

Il seminato di punti (1), come specificato in precedenza, può essere generalmente fornito in due modi differenti:

- secondo una disposizione irregolare, in forma di:
 - nuvola di punti (*point cloud*), ovvero un insieme di punti noti nelle 3 coordinate (E, N, Q) senza alcuna informazione circa le caratteristiche della superficie del territorio tra un punto e l'altro, ovvero senza alcuna regola predefinita di interpretazione del dato altimetrico. Le tecniche di interpolazione applicabili sono molteplici e spesso legate al *software* che utilizza il modello altimetrico;

- *Triangulated Irregular Network (TIN)*, ovvero un insieme di punti disposti nello spazio collegati mediante una serie continua di triangoli (un insieme di triangoli i cui vertici sono i punti misurati, vedi Figura 2). Si presuppone la realizzazione di una operazione di triangolazione spesso eseguita mediante l'algoritmo di Delaunay. Si ricorda che dato un seminato di punti non è univoca la realizzazione della maglia di triangoli, ovvero in funzione del primo triangolo definito e delle regole applicate nella triangolazione si possono ottenere triangoli differenti: per realizzare un modello altimetrico univoco è necessario definire anche i vari triangoli che lo compongono. All'interno di ogni triangolo la superficie descritta viene interpretata, ai fini dell'interpolazione, come un piano (passante per i tre vertici del triangolo). I triangoli formati dalla triangolazione non devono attraversare linee caratteristiche o *breakline*. Le spezzate che descrivono linee caratteristiche o *breakline* sono sempre impiegate come lati di triangoli e i loro vertici come punti nella generazione del modello altimetrico;



- Secondo una disposizione regolare (vedi Figura 3), in cui i punti del seminato sono in genere disposti ai vertici di una griglia, con spaziatura uniforme nelle coordinate utilizzate. La spaziatura tra i vertici della griglia (o passo di griglia) deve essere sufficientemente ridotta, così da permettere di impiegare anche l'interpolazione lineare, ma non troppo piccola, per consentire di trattare aree anche relativamente estese con i normali pacchetti *software* per l'utilizzo dei modelli altimetrici.

II.1.4 SISTEMA DI RIFERIMENTO

Nella produzione dei modelli altimetrici si prevede l'utilizzo del sistema di riferimento definito in base a:

- il sistema geodetico (*datum*) ETRS89 nella sua realizzazione ETRF89 o eventualmente più recente (*Ellissoide WGS84*);

- la rappresentazione conforme UTM (*coordinate cartografiche UTM/WGS84*);
- il geoide come superficie di riferimento delle quote (ortometriche).

Il legame tra quote ellissoidiche e quote ortometriche è definito dal modello di geoide (ITALGEO) più recente (attualmente ITALGEO2005), messo a disposizione dall'Istituto Geografico Militare.

Qualora i dati siano richiesti anche in altri sistemi geodetici . cartografici utilizzati in ambito nazionale (ROMA1940, ED1950), le trasformazioni dovranno essere eseguite con la metodologia e gli strumenti messi a disposizione dall'Istituto Geografico Militare (procedura Verto, nella versione più recente, attualmente Verto 3).

Si noti che un grigliato con passo regolare in generale non lo sarà più in seguito alla trasformazione di *datum*: in questo caso occorrerà effettuare una nuova regolarizzazione che dovrà comportare un decadimento di precisione entro i limiti indicati di tolleranza.

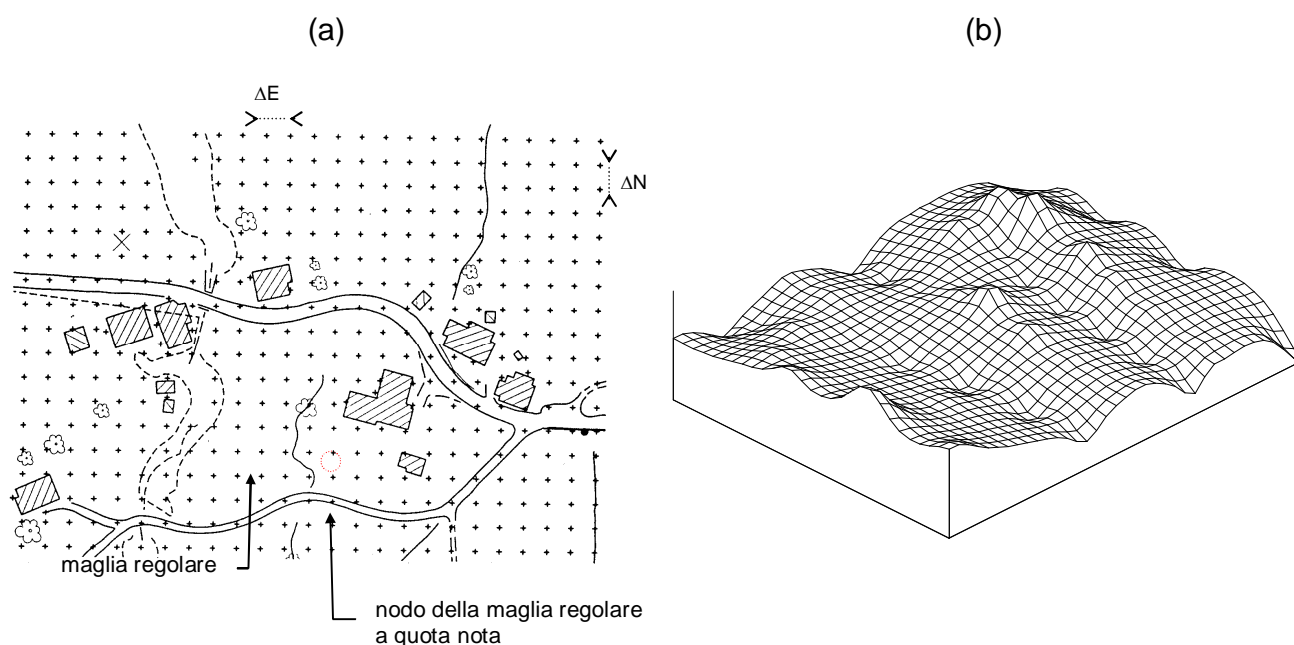


Figura 3 - I modelli altimetrici a disposizione regolare (a) vista in planimetria, (b) vista assonometrica

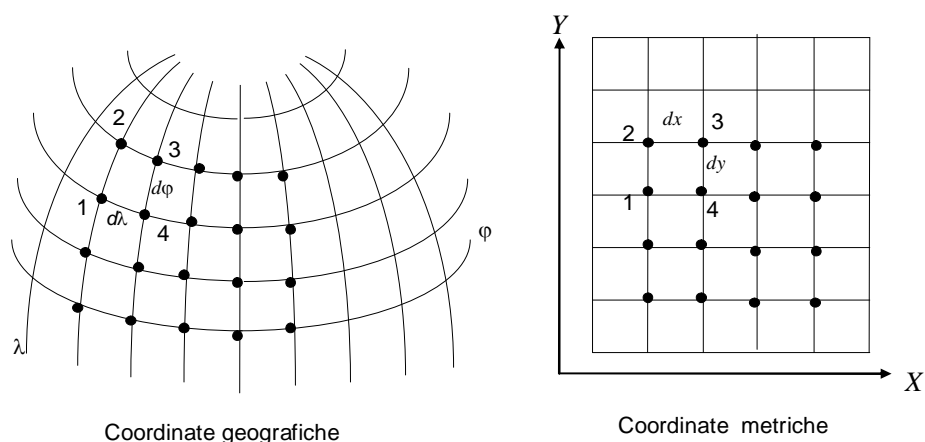


Figura 4 - I grigliati regolari in coordinate geografiche e in coordinate metriche

Per ulteriori dettagli sul sistema di riferimento a livello Nazionale si rimanda a quanto previsto nel progetto di ricerca Lotto 1: Reti geodetiche del Centro Interregionale di Coordinamento e documentazione per le informazioni territoriali.

Un modello altimetrico a maglia regolare può essere costruito utilizzando un grigliato metrico o un grigliato geografico (vedi Figura 4).

Il grigliato metrico è usato per descrivere porzioni di territorio limitate, generalmente comprese entro un fuso della rappresentazione UTM, la densità di campionamento è omogenea nelle due direzioni cartografiche X,Y e ha inoltre il vantaggio di essere direttamente sovrapponibile senza trasformazioni di coordinate alla cartografia numerica preesistente.

Per porzioni di territorio comprese in più fusi, si suggerisce di utilizzare le coordinate geografiche riferite al medesimo *datum*, al posto di quelle cartografiche.

Il grigliato geografico è usato di solito per modelli altimetrici a scala regionale o nazionale. Presenta il vantaggio di essere continuo, ossia di non avere soluzioni di continuità dovute al cambio del fuso. Il passo, di solito, è espresso in secondi sessagesimali. Presenta lo svantaggio di non avere una densità omogenea: dal punto di vista metrico non possono infatti essere garantite contemporaneamente l'omogeneità nel campionamento metrico e nel campionamento geografico.

II.1.5 REQUISITI DI QUALITÀ DEI MODELLI ALTIMETRICI

II.1.5.1 Spaziatura della griglia

Un parametro fondamentale da fissare nel definire gli standard di qualità dei modelli altimetrici è il passo di griglia del modello altimetrico a disposizione regolare. Infatti, l'utilizzo del modello altimetrico può prevedere una semplice interpolazione bilineare per definire le quote del territorio all'interno della griglia, la cui maglia deve essere sufficientemente piccola per garantire i limiti di precisione previsti. Non si dimentichi che associate al grigliato di punti sono sempre presenti le linee caratteristiche (*breakline* ecc.) che ne completano l'informazione e permettono un'interpolazione corretta.

I valori di riferimento sono basati su un precedente studio di Ackermann e adattati sulla base di un recente studio dell'OEEPE (A. Flotron e O. Kölbl: *Precision Terrain Models for Civil Engineering*, OEEPE Publication, P 32-134, December 2000). In Tabella 1, che sintetizza i risultati dello studio, sono riportate le indicazioni sulla distanza di griglia in funzione del tipo di terreno (piano, ondulato, accidentato) e della precisione desiderata.

Tenuto conto della Tabella 1 considerando cautelativamente il terreno accidentato, in funzione del livello di precisione dei modelli altimetrici, è possibile adottare, i seguenti passi di griglia:

- precisione in quota tra ± 0.15 m e ± 0.30 m: passo della griglia 2-3 m;
- precisione in quota tra ± 0.40 m e ± 1 m: passo della griglia 5 m;
- precisione in quota tra ± 1 m e ± 2.5 m: passo della griglia 10 m;
- precisione in quota ± 3 m e inferiore: passo della griglia 20 m.

Con precisioni inferiori a ± 5 m, è possibile impiegare spaziature maggiori (anche 50-100m).

Nel caso di modelli altimetrici densi, viene meno il legame tra precisione nell'interpolazione e spaziatura della griglia: infatti, in questi casi la condizione più restrittiva è la descrizione

corretta della superficie del territorio in mancanza di linee di discontinuità. Si può considerare come ordine di grandezza della spaziatura del modello altimetrico, la tolleranza planimetrica della scala di rappresentazione nominale associata, come indicato in Tabella 2.

Precisione altimetrica	Distanza tra i nodi della griglia in funzione del tipo di terreno		
	<i>piano</i>	<i>ondulato</i>	<i>accidentato</i>
(m)	(m)	(m)	(m)
10	131	82	47
4	66	41	23
2	41	26	15
0.8	20	13	7
0.4	13	8	5
0.2	8	5	3

Tabella 1 - Spaziatura della griglia del DTM secondo studio OEEPE

Scala di rappresentazione	Precisione grafica (mm)	Precisione planimetrica (m)	Spaziatura della griglia (m)
1:10000	0.2	2.00	2.00
1:5000	0.2	1.00	1.00
1:2000	0.2	0.40	0.40
1:1000	0.2	0.20	0.20
1:500	0.2	0.10	0.10

Tabella 2 - La spaziatura della griglia per i modelli altimetrici densi

Semplificando la Tabella 2 in funzione delle attuali tecniche di generazione è possibile adottare, le seguenti spaziature della griglia nei modelli altimetrici densi:

- scala 1:10000: passo della griglia 2 m;
- scala 1:5000: passo della griglia 1 m;
- scala 1:2000: passo della griglia 0.50 m;
- scale 1:1000 e 1:500: passo della griglia 0.10-0.20 m.

II.1.5.2 Precisione e tolleranza dei modelli altimetrici

I dati di un modello altimetrico siano essi provenienti da cartografia, misure fotogrammetriche, LIDAR o quant'altro, possiedono una precisione inferiore rispetto a quelle delle misure effettuate nelle reti di tipo geodetico. I valori di riferimento per operazioni di controllo di qualità sono infatti quelli dei caposaldi delle reti altimetriche di inquadramento geodetico, la cui precisione è normalmente di alcuni millimetri. Misure di alta precisione con strumentazione geodetica possono pertanto essere considerate come valori di riferimento e di controllo per i dati dei modelli altimetrici. Gli scostamenti dei dati dei modelli altimetrici da questi valori di riferimento sono considerati errori, che possono avere carattere sia accidentale sia sistematico.

Per quanto riguarda gli errori accidentali, verrà usata nel seguito la deviazione standard o scarto quadratico medio σ (vedi glossario). La precisione dei modelli altimetrici viene espressa in funzione della scala nominale della corrispondente cartografia numerica. In particolare si possono estendere le precisioni consigliate (σ) dalla Commissione Geodetica Italiana e le relative tolleranze ($T_Q=2\sigma_Q$ e $T_{EN}=1.7308 \sigma_{EN}$ dove σ_Q è lo scarto quadratico medio relativo alla componente d'altezza e σ_{EN} lo scarto quadratico medio relativo alle componenti planimetriche) per:

- la quota dei punti del modello altimetrico e delle linee caratteristiche (*breakline*, contorno di zone morte ecc.) in campo aperto: 0.15 mm alla scala della carta, a cui corrisponde una tolleranza definita $T_{Q(a)}$;
- la quota dei punti del modello altimetrico e delle linee caratteristiche (*breakline*, contorno di zone morte ecc.) in presenza di alberatura folla (copertura arborea > 70%): 0.30 mm alla scala della carta a cui corrisponde una tolleranza definita $T_{Q(b)}$;
- la quota dei punti del modello di descrizione degli edifici: 0.2 mm alla scala della carta a cui corrisponde una tolleranza definita $T_{Q(c)}$;
- la descrizione planimetrica dei punti del modello altimetrico e delle linee caratteristiche (*breakline*, contorno di zone morte ecc.): 0.2 mm alla scala della carta a cui corrisponde una tolleranza definita T_{EN} .

In Tabella 3 sono riassunti i valori di precisione e tolleranza in ambito altimetrico (a e b), in Tabella 4 i medesimi valori per le componenti planimetriche.

Scala nominale	Altimetria in campo aperto (a)			Altimetria per (copertura arborea >70%) (b)			Altimetria per edifici (c)		
	Precis. grafica (mm)	$P_{Q(a)}$ (σ_Q) (m)	$T_{Q(a)}$ ($2\sigma_Q$) (m)	Precis. grafica (mm)	$P_{Q(b)}$ (σ_Q) (m)	$T_{Q(b)}$ ($2\sigma_Q$) (m)	Precis. grafica (mm)	$P_{Q(c)}$ (σ_Q) (m)	$T_{Q(c)}$ ($2\sigma_Q$) (m)
1:10000	0.15	1.50	3.00	0.30	3.00	6.00	0.20	2.00	4.00
1:5000	0.15	0.75	1.50	0.30	1.50	3.00	0.20	1.00	2.00
1:2000	0.15	0.30	0.60	0.30	0.60	1.20	0.20	0.40	0.80
1:1000	0.15	0.15	0.30	0.30	0.30	0.60	0.20	0.20	0.40
1:500	0.15	0.08	0.15	0.30	0.15	0.30	0.20	0.10	0.20

Tabella 3. Precisioni e tolleranze in altimetria

Scala nominale	Planimetria (d)		
	Precisione grafica (mm)	P_{EN} (σ_{EN}) (m)	T_{EN} ($1.7308 \sigma_{EN}$) (m)
1:10000	0.20	2.00	3,46
1:5000	0.20	1.00	1,73
1:2000	0.20	0.40	0,69
1:1000	0.20	0.20	0,35
1:500	0.20	0.10	0,17

Tabella 4 - Precisioni e tolleranze in planimetria per i modelli altimetrici

I valori $T_{Q(a)}, T_{Q(b)}, T_{Q(c)}$ ($2\sigma_Q$) sono corrispondenti a un livello di probabilità pari al 95.44% nel caso di distribuzione normale monodimensionale e possono essere sostanzialmente considerati coincidente con il valore $LE95 = 1.96 \sigma$ (corrisponde a un livello di probabilità pari al 95.00%)

Il valore $T_{EN}=1.7308 \sigma_{EN}$ corrisponde al valore CE95 indicato nelle normative mondiali standard ISO/TC 211-1: 2013 - Geographic information - Data quality measures - N 2029 del 5 giugno 2006 (211n2029) come indice di qualità di dati bivariati (x e y). Tale valore indica il raggio del cerchio centrato nella posizione planimetrica vera (teorica) che contiene le posizioni stimate con il 95% di probabilità.

Si rimanda al V.3.1.3 per approfondimenti sull'argomento.

II.1.5.3 Massimo errore sistematico

Oltre a quella per gli errori accidentali è importante definire una tolleranza per gli errori sistematici. La componente accidentale varia da punto a punto e l'errore nei punti circostanti può già compensarne gli effetti nelle varie applicazioni ingegneristiche. Questo non accade per le componenti sistematiche, derivanti da errori nell'orientamento del modello in fotogrammetria, da errori nei punti di inquadramento per le misure con strumentazione topografica, ecc. Le componenti d'errore sistematico sono quelle più temibili nelle attività che interessano movimenti di terra o deflusso di acque.

Pertanto, si prescrive che la componente sistematica ES_{max} non debba superare 1/2 dello scarto quadratico medio (σ_Q), ottenendo i valori indicati in Tabella 5.

Scala nominale	$P_{Q(a)}$ (σ_Q) (m)	ES_{max} (m)
1:10000	1.50	0.75
1:5000	0.75	0.40
1:2000	0.30	0.15
1:1000	0.15	0.08
1:500	0.08	0.04

Tabella 5 - Valori massimi dell'errore sistematico alle varie scale

II.1.5.4 Linee caratteristiche

Il modello altimetrico deve essere integrato da *breakline* e punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno, all'interno di una maglia del grigliato, maggiori della precisione planimetrica.

In particolare nel caso di DEM, i dati utili alla generazione delle *breakline* da acquisire sono i seguenti:

- tutte le strade (lato destro e sinistro) e le strade ferrate con le eventuali scarpate (piede e cima, in entrambi i lati), sia in trincea che in rilevato. Dovranno essere opportunamente distinti i ponti e viadotti, la cui informazione non dovrà essere utilizzata come *breakline*;
- i corsi dei fiumi comprensivi sia degli argini che delle sponde;
- fossi e canali;

- d. i punti quotati, che saranno successivamente riportati sull'elemento cartografico da produrre. I punti quotati sono restituiti sempre sul terreno; in caso contrario devono essere codificati in modo tale da non essere utilizzati nella generazione del modello altimetrico (punti quotati su ponti, ecc.);
- e. i terrazzamenti, che devono essere rilevati delimitandone i bordi. In particolare devono essere restituite le cave e le miniere a cielo aperto;
- f. le zone rocciose con brusche variazioni in quota vengono delimitate con poligoni e al loro interno inseriti punti e/o *breakline* con la densità tale da garantire le distanze minime tra le quote, come enunciato al punto precedente;
- g. muri di sostegno (piede e sommità);
- h. le linee di costa relative ai laghi: la quota dei laghi, naturali e artificiali, deve essere la stessa per tutto l'invaso;
- i. i crinali e le vette;
- j. i calanchi;
- k. linee di fondo valle, in particolare quando non sono presenti corsi d'acqua;
- l. delimitazioni di colture, dove esiste un cambiamento di pendenza;
- m. particolari forme del terreno difficilmente ricostruibili con soli punti quotati (come conoidi o selle);
- n. profili altimetrici che indicano un cambiamento di segno della pendenza del terreno (linee evidenti di compluvio e di impluvio);
- o. profili altimetrici che aiutano a descrivere l'andamento del terreno pur non essendoci variazioni sensibili in quota.

Per il DEM, non è richiesta la descrizione mediante *breakline* dell'edificio.

Per modelli altimetrici di tipologia DSM occorre aggiungere, oltre alle linee caratteristiche precedenti:

- p. le linee di descrizione volumetrica dell'edificio e i punti quotati in gronda opportunamente codificati. Per le grandissime scale, è richiesta una vera e propria carta dei tetti per descrivere correttamente le coperture;
- q. le linee di descrizione dei bordi di ponti e viadotti, corredati dai punti quotati di descrizione altimetrica lungo la loro superficie, opportunamente codificati.
- r. i contorni delle piante arboree principali.

Nel caso di modelli altimetrici densi non è necessaria la definizione di nessuna *breakline*.

II.1.6 IL FORMATO DEI DATI

I dati dei modelli altimetrici sopra descritti devono essere memorizzati e resi disponibili all'utente in un formato adatto. Vanno quindi distinti 3 insiemi di dati:

1. Metadati
2. Dati grigliati (raster)
3. Dati vettoriali

II.1.6.1 Metadati

I metadati devono essere strutturati secondo quanto stabilito dal Documento %REPERTORIO NAZIONALE DEI DATI TERRITORIALI - Linee guida per l'applicazione dello Standard ISO 19115 *Geographic Information . Metadata+* (vers. 0.1 e s.m.i.) emanato dal Comitato tecnico

nazionale per il coordinamento informatico dei dati territoriali, istituito con Decreto del Ministro per l'Innovazione e le Tecnologie in base a quanto previsto dall'art. 59 del Codice dell'Amministrazione Digitale.

II.1.6.2 Dati grigliati

Oggi quasi tutti i formati di scambio sono di tipo ASCII, essendo questo supportato dalla maggior parte delle applicazioni *software*. Non esistono tuttavia formati condivisi per i dati contenuti nei modelli altimetrici né raster né vettoriali. Si raccomanda pertanto di adottare, relativamente ai dati grigliati, quelli già in uso presso l'I.G.M. e le Regioni o Province Autonome che hanno già realizzato il modello altimetrico del proprio territorio.

Come già detto, diversi enti in Italia adottano il formato GRID-ASCII per la memorizzazione dei modelli a griglia (ESRI).

All'inizio di ogni file (HEADER) sono riportati in sequenza:

1. il numero di colonne (NCOLS);
2. il numero di righe (NROWS);
3. le coordinate espresse e con valori metrici (m) o angolari ($^{\circ}$,xxxx per angoli sessa decimali o $^{\circ} \pm \%$ per quelli sessagesimali nel caso di grigliati geografici) del primo vertice (XLLCORNER, YLLCORNER) o, in alternativa, del primo punto in basso a sinistra (XLLCENTER, YLLCENTER), dell'unità di memorizzazione;
4. la dimensione della cella (CELLSIZE);
5. il valore corrispondente alla quota non significativa (in genere NODATA = -9999).

Segue la matrice delle NROWS x NCOLS quote del modello, separate da uno spazio (" "); i valori delle quote sono rappresentate in metri con al più due decimali (singola precisione); il separatore decimale è il punto (".").

Per esempio:

```
NCOLS 364
NROWS 620
XLLCORNER 1701120
YLLCORNER 5147220
CELLSIZE 20
NODATA_VALUE -9999
2411.22 2411.22 ...
... 2417.17 2417.17 ...
... .
```

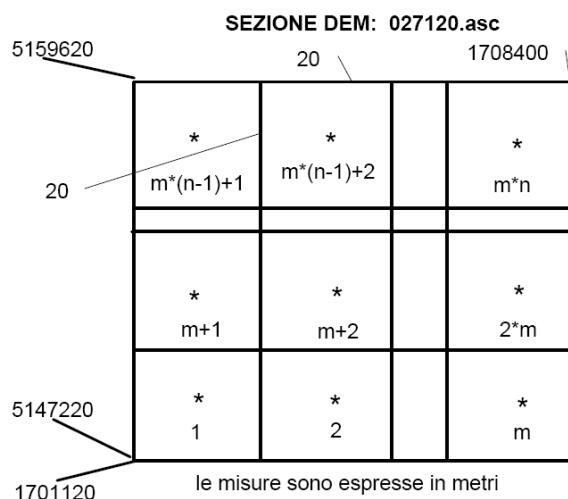


Figura 5 - Un esempio di file in formato GRID ASCII

In alternativa, è possibile utilizzare il formato GRASS ASCII GRID, utilizzato dal *software* GIS *open source* denominato GRASS. Tale formato è in grado di memorizzare modelli altimetrici con dimensione della cella non omogenea in ascissa e ordinata.

All'inizio di ogni file (HEADER) sono riportati in sequenza:

1. ordinata massima n (Nord) del grigliato (north: n);

2. ordinata minima s (Sud) del grigliato (`south: s`);
3. ascissa minima e (Est) del grigliato (`east: e`);
4. ascissa massima w (Ovest, West) del grigliato (`west: w`);
5. numero di righe `nrows` (`rows: nrows`);
6. numero di colonne `ncols` (`cols: ncols`);

Segue la matrice delle `NROWS` x `NCOLS` quote del modello, separate da uno spazio (" "); i valori delle quote sono rappresentate in metri con al più due decimali (singola precisione); il separatore decimale è il punto ("."). In Figura 6 è visibile un esempio di formato GRASS ASCII GRID avente 10 righe e 5 colonne

```
north: 3451250
south: 3438850
east: 298960
west: 290860
rows: 10
cols: 5
10.01 11.02 12.12 10.56 16.3
11.01 13.02 15.17 18.51 19.21
... (per altre 8 righe)
```

Figura 6 - Il formato GRASS ASCII GRID

II.1.6.3 Taglio dei file

Si raccomanda di limitare le dimensioni dei *file* di dati così da avere blocchi relativamente semplici da gestire. Si suggerisce che ogni file rappresenti una zona di forma quadrata, o approssimativamente tale, contenente al massimo 5 milioni di punti. Allo scopo, i modelli altimetrici, pur essendo generati e visualizzabili in continuo su tutto il territorio rilevato, dovranno essere consegnati secondo una suddivisione in *file* separati.

La dimensione dei modelli altimetrici identifica l'estensione di territorio rappresentato e può variare in funzione delle esigenze legate all'utilizzo degli stessi, abbracciando un territorio relativo a una città, a un'area specifica o corrispondente al sottomultiplo di un elemento di una serie cartografica ufficiale.

Il taglio relativo ai modelli altimetrici realizzati in unità metriche viene realizzato seguendo un *taglio cartografico* secondo rette appartenenti a un reticolato cartografico (Est e Nord costanti).

A meno di esigenze particolari, legate ad eventuali riferimenti cartografici specifici, il modulo minimo di produzione dei modelli altimetrici dovrà essere costituito dalla porzione di territorio, coperta da una mappa del taglio cartografico standard (proposto dalla Commissione Geodetica Italiana e visibile in Figura 7) corrispondente alla scala nominale del modello altimetrico memorizzato.

Tali mappe seguono però un *taglio geografico* ottenuto mediante trasformate di meridiani e paralleli (latitudine e longitudine costanti): ne risulta una situazione simile alla Figura 8, in cui i bordi del foglio di mappa considerato risultano generalmente ruotati rispetto alle direzioni del grigliato regolare del modello altimetrico (secondo coordinate Est e Nord costanti). Di

conseguenza, il taglio del modello altimetrico dovrà essere un po' più grande in modo da circoscrivere i contorni del foglio di mappa fino alle direzioni dei lati del reticolo del grigliato più esterni. In dettaglio, gli estremi del taglio del modello altimetrico possono essere determinati nel modo seguente:

- si determinano le coordinate E_{Fmin}, N_{Fmin} minime tra le coordinate dei 4 vertici del foglio di mappa corrispondente;
- le coordinate E_1, N_1 del primo nodo (in basso a sinistra) del grigliato del modello altimetrico si determinano, indicando con D la spaziatura della griglia e con int l'operatore che restituisce la parte intera di un numero in virgola mobile, come:

$$E_1 = \text{int}(E_{Fmin} / D) \cdot D \quad N_1 = \text{int}(N_{Fmin} / D) \cdot D ;$$

- si determinano le coordinate E_{Fmax}, N_{Fmax} massime tra le coordinate dei 4 vertici del foglio di mappa corrispondente;
- le coordinate E_2, N_2 dell'ultimo nodo (in alto a destra) del grigliato del modello altimetrico si determinano come:

$$E_2 = \text{int}(E_{Fmin} / D + 1) \cdot D \quad N_2 = \text{int}(N_{Fmin} / D + 1) \cdot D .$$

Allo scopo di evitare sovrapposizioni con i modelli altimetrici adiacenti, i punti del grigliato esterni all'area del foglio di mappa vengono azzerati (NO DATA = -9999.).

Ogni file di consegna del modello altimetrico viene memorizzato per esempio in formato GRID ASCII e denominato con il nome della mappa cartografica ed estensione .asc.

Nel caso di modelli altimetrici forniti in coordinate geografiche il taglio in fogli deve essere realizzato secondo il taglio geografico visibile in Figura 7. In questo caso, le problematiche descritte in precedenza non hanno più ragione di esistere.

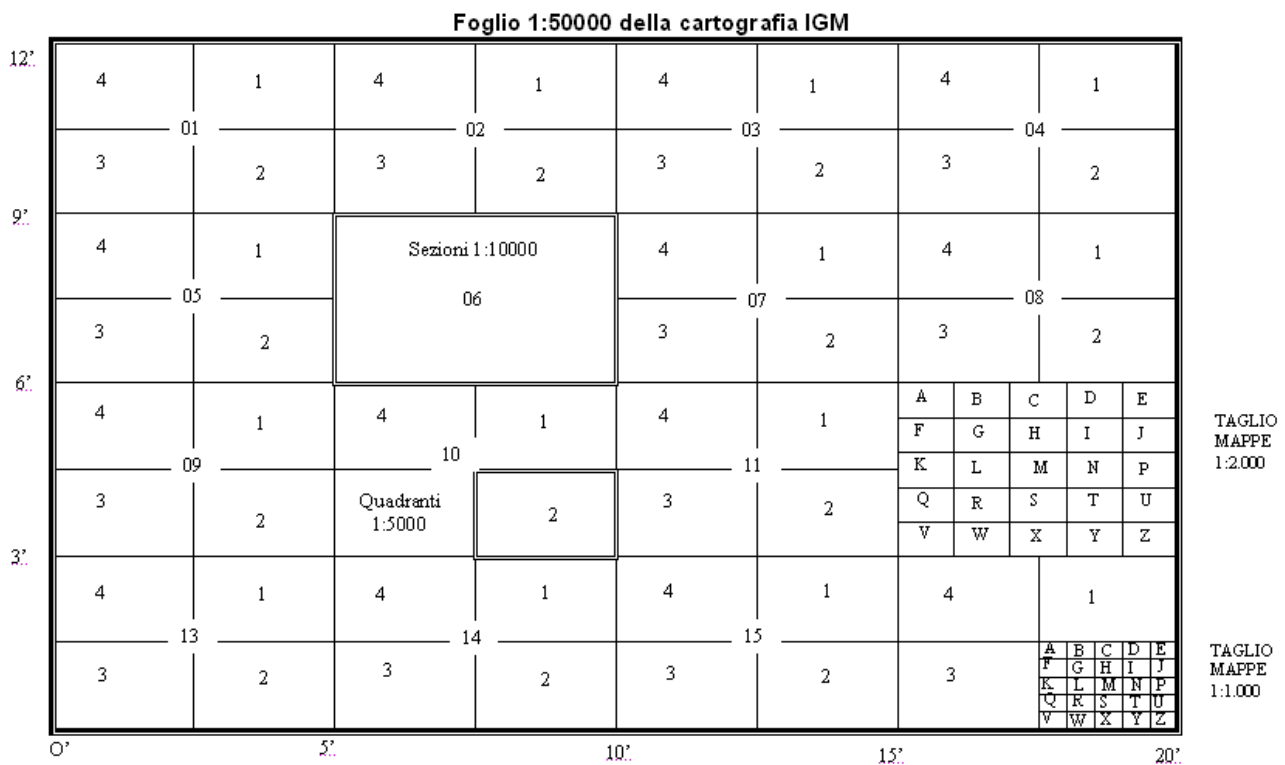


Figura 7. Il taglio dei fogli di cartografia secondo la normativa vigente

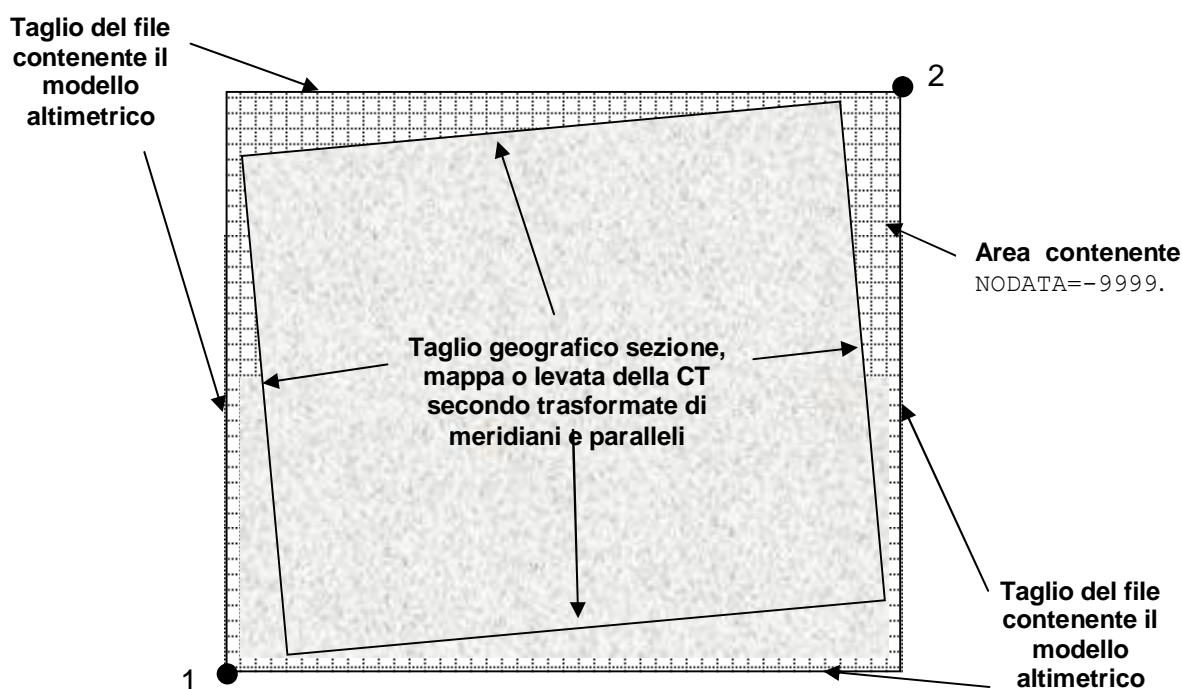


Figura 8 - Relazione tra taglio dei modelli altimetrici e taglio della CT

II.1.7 DATI VETTORIALI

Per quanto riguarda i dati vettoriali (*breakline*, linee di struttura del terreno e di delimitazione delle "zone morte") si suggerisce che siano memorizzati nel formato .DXF di Autodesk o .SHP di ESRI. In particolare:

- i contorni che delimitano un'area (delimitazione delle zone morte, limite dell'area rappresentata, ∂) devono essere descritti con polilinea 3D chiusa;
- le *breakline* devono essere descritte mediante polilinea 3D aperta;
- nella rappresentazioni di linee di struttura del terreno si richiede, quando possibile, di soddisfare le condizioni di congruenza geometrica e topologica.

II.1.8 DATA DEL RILIEVO

La data del modello altimetrico coinciderà con la data di acquisizione dei dati primari da cui è stato derivato. In particolare, in funzione della tecnica di produzione utilizzata:

- Data del volo fotogrammetrico;
- Data dell'acquisizione delle immagini da piattaforma satellitare;
- Data del volo LIDAR;
- Data di produzione della cartografia da cui viene derivato.

II.1.9 LIVELLI DI PRECISIONE DEI MODELLI ALTIMETRICI

Le caratteristiche principali indicate nei paragrafi precedenti (tipologia, precisioni e tolleranze in quota e in planimetria, passo della griglia, errore sistematico massimo, ecc.) sono state

raccolte in un insieme di livello di precisione dei modelli altimetrici, al fine di giungere ad una semplice schematizzazione riassuntiva. Alcuni valori indicati in precedenza sono stati arrotondati o lievemente corretti per permettere una più agevole integrazione tra modelli altimetrici generati ai differenti livelli e una maggior coerenza tra gli standard stabiliti e le tecniche produttive utilizzate.

In Tabella 6, sono riassunti i parametri principali delle specifiche tecniche relative ai vari livelli. Nei paragrafi seguenti, queste informazioni sono analizzate nel dettaglio.

Livello	Tipo	Passo (m)	$T_{Q(a)}$ (m)	$T_{Q(b)}$ (DEM) (m)	$T_{Q(c)}$ (DSM) (m)	ES_{max} (m)	T_{EN} (m)
0	DEM, DSM	40-100	30	30	30	5	20
1	DEM, DSM	20	10	20	10	2.5	10
2	DEM, DSM	20	4	½ al.m.al.	5	1	4
3	DEM, DSM	10	2	½ al.m.al.	3	0.50	2
4	DEM, DSM	5	0.60	1.20	0.80	0.15	0.60
5	DEM, DSM	2	0.40	0.80	0.54	0.10	0.40
6	DDEM, DDSM	1	0.60	1.20	0.80	0.15	0.60
7	DDEM, DDSM	0.50	0.30	0.60	0.40	0.08	0.30
8	DDEM, DDSM	0.10-0.20	0.20	0.30	0.26	0.05	0.20

(al.m.al. = altezza media alberatura)

Tabella 6 - Tabella riassuntiva delle caratteristiche dei vari livelli di modelli altimetrici

II.1.9.1 Specifiche per il livello 0

Tipologia DEM o DSM

Precisione in quota: in campo aperto $P_{Q(a)} = 15$ m
 con copertura arborea > 70% $P_{Q(b)} = 15$ m (nel caso di DEM)
 edifici (nel caso di DSM) $P_{Q(c)} = 15$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{Q(a)} = 30$ m
 con copertura arborea > 70% $T_{Q(b)} = 30$ m (nel caso di DEM)
 edifici (nel caso di DSM) $T_{Q(c)} = 30$ m

Errore sistematico altimetrico massimo $ES_{max} = 5$ m

Precisione planimetrica: $P_{EN} = 10$ m (0.2 mm alla scala 1:50.000);

Tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 20$ m

passo di griglia 40-100 m

Breakline per i seguenti oggetti: linee di costa dei laghi, corsi d'acqua importanti, mari. Le **breakline** devono seguire il terreno con la precisione sopra definita.

Applicazioni principali: ortofoto alla scala 1:10.000 da immagini ad alta e altissima risoluzione da satellite con ripresa nadirale.

Aree di applicazione: ovunque, in mancanza di dati di maggior precisione.

Sorgente dei dati: DTM a bassa precisione dell'I.G.M, SRTM, modelli altimetrici da immagini acquisite da satellite.

II.1.9.2 Specifiche per il livello 1

Tipologia DEM o DSM

Precisione in quota: in campo aperto $P_{Q(a)} = 5$ m
 con copertura arborea > 70% $P_{Q(b)} = 10$ m (nel caso di DEM)
 edifici (nel caso di DSM) $P_{Q(c)} = 5$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{Q(a)} = 10$ m
 con copertura arborea > 70% $T_{Q(b)} = 20$ m (nel caso di DEM)
 edifici (nel caso di DSM) $T_{Q(c)} = 10$ m

Errore sistematico altimetrico massimo $ES_{max} = 2.5$ m

Precisione planimetrica: $P_{EN} = 5$ m (0.2 mm alla scala 1:25.000);

Tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 10$ m

Passo di griglia 20 m

Breakline sempre necessarie per i seguenti oggetti: viadotti alti oltre 10 m, linee di costa di laghi e mari, rive di fiumi. Le *breakline* devono seguire il terreno con la precisione sopra specificata.

Applicazioni principali: ortofoto alla scala 1:10.000 riprese con campo normale, ortofoto alla scala 1:10.000 e 1:5.000 da immagini nadirali ad alta risoluzione riprese da satellite

Aree di applicazione: zone alta montagna con piccoli insediamenti e sfruttamento agricolo estensivo; ovunque, in mancanza di dati o DTM di maggior precisione.

Sorgente dei dati: dati DTM dalle Regioni, DTM di precisione dell'I.G.M., dati AIMA e it2000, DTM derivato da cartografia tecnica 1:10.000 numerizzata o di qualità inferiore alle CTR 1:10.000 standard.

II.1.9.3 Specifiche per il livello 2

Tipologia DEM o DSM

Precisione in quota: in campo aperto $P_{Q(a)} = 2$ m
 Copert. arborea > 70% $P_{Q(b)} = 1/4$ altezza media alberi (nel caso di DEM)
 edifici (nel caso di DSM) $P_{Q(c)} = 2.50$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{Q(a)} = 4$ m
 Copert. arborea > 70% $T_{Q(b)} = 1/2$ altezza media alberi (nel caso di DEM)
 edifici (nel caso di DSM) $T_{Q(c)} = 5$ m

Errore sistematico altimetrico massimo $ES_{max} = 1$ m

Precisione planimetrica: $P_{EN} = 2$ m (0.2 mm alla scala 1:10.000);

Tolleranza planimetrica $T_{EN} = 4$ m

Passo di griglia 20 m

Breakline o punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno maggiori di 4m entro una maglia del tagliato.

Breakline sempre necessarie per i seguenti oggetti: dighe, viadotti, linee di costa di laghi, fiumi, mari e impluvi; le *breakline* devono seguire il terreno con la precisione sopra specificata.

Delimitazione delle aree non rappresentabili (zone morte): specchi d'acqua, zone di minor precisione per densa vegetazione. Le linee di delimitazione devono indicare la quota del terreno, altrimenti (ad es. se appartenenti a un tetto) devono avere quota convenzionale; gli specchi d'acqua devono seguire il terreno.

Delimitazione della zona rappresentata sempre presente.

Applicazioni principali: ortofoto alla scala 1:10.000 (e 1:5.000 solo se riprese con campo normale ($f=300\text{mm}$)); studi ambientali; delimitazione dei bacini idrografici.

Aree di applicazione: Aree lontane da centri urbani caratterizzate da colture estensive, in mancanza di DTM di maggior precisione.

Sorgente dei dati: CTR alla scala 1:10.000 o superiore, fotogrammetria, scanner laser.

II.1.9.4 Specifiche per il livello 3

Tipologia DEM o DSM

Precisione in quota: in campo aperto $P_{Q(a)} = 1 \text{ m}$

copert. arborea > 70% $P_{Q(b)} = 1/4$ altezza media alberi (nel caso di DEM)

edifici (nel caso di DSM) $P_{Q(c)} = 1.50 \text{ m}$

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{Q(a)} = 2 \text{ m}$

copert. arborea > 70% $T_{Q(b)} = 1/2$ altezza media alberi (nel caso di DEM)

edifici (nel caso di DSM) $T_{Q(c)} = 3 \text{ m}$

Errore sistematico altimetrico massimo $ES_{max} = 0.50 \text{ m}$

Precisione planimetrica: $P_{EN} = 1 \text{ m}$ (0.2 mm alla scala 1:5000);

Tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 2 \text{ m}$

Passo di griglia 10 m

Breakline o punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno maggiori di 2m entro una maglia del grigliato.

Breakline necessarie per i seguenti oggetti: dighe, viadotti, linee di costa di laghi, fiumi e mari, impluvi; le *breakline* devono seguire il terreno con la precisione sopra specificata.

Delimitazione delle aree non rappresentabili (zone morte): specchi d'acqua, zone di minor precisione per densa vegetazione. Le linee di delimitazione devono indicare la quota del terreno, altrimenti (ad es. se appartenenti ad un tetto) devono avere quota convenzionale; gli specchi d'acqua devono seguire il terreno.

Delimitazione della zona rappresentata sempre presente.

Applicazioni principali: ortofoto a scala 1:10.000 e 1:5.000 (e a scala 1:2000, ma solo se riprese con campo normale, $f=300\text{mm}$); studi ambientali; delimitazione dei bacini idrografici.

Aree di applicazione: aree edificate a bassa densità e zone agricole di elevato valore, nelle zone da rappresentarsi alla scala 1:5.000.

Sorgente dei dati: CTR alla scala 1:5.000 o superiori, fotogrammetria, scanner laser; opportuni nuovi rilievi fotogrammetrici se previste ortofoto a scala 1:5.000 o superiore.

II.1.9.5 Specifiche per il livello 4

Tipologia DEM o DSM

Precisione in quota: in campo aperto $P_{Q(a)} = 0.3$ m,
con copertura arborea > 70% $P_{Q(b)} = 0.6$ m (nel caso di DEM)
edifici (nel caso di DSM) $P_{Q(c)} = 0.40$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{Q(a)} = 0.6$ m
con copertura arborea > 70% $T_{Q(b)} = 1.2$ m (nel caso di DEM)
edifici (nel caso di DSM) $T_{Q(c)} = 0.80$ m

Errore sistematico altimetrico massimo $ES_{max} = 0.15$ m

Precisione planimetrica: $P_{EN} = 0.30$ m (0.3 mm alla scala 1:1000);

Tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 0.60$ m

Passo di griglia 5 m

Breakline o punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno maggiori di 0.60 m entro una maglia del grigliato.

Breakline sempre necessarie per i seguenti oggetti: limiti delle strade (possibilmente ciglio stradale e piede della scarpa), dighe (ciglio e piede), ponti, viadotti, linee di costa di laghi, fiumi e mari, impluvi; le *breakline* devono seguire il terreno con la precisione sopra specificata.

Delimitazione delle aree non rappresentabili (zone morte): edifici, specchi d'acqua, zone di minor precisione per densa vegetazione. Le linee di delimitazione devono indicare la quota del terreno, altrimenti (ad es. se appartenenti ad un tetto) devono avere quota convenzionale; gli specchi d'acqua devono seguir e il terreno.

Delimitazione della zona rappresentata sempre presente.

Applicazioni principali: ortofoto alla scala 1:1000; a scala 1:500 solo se riprese con campo normale ($f=300$ mm); applicazioni ingegneristiche e di pianificazione.

Area di applicazione: aree a rischio di inondazione aventi pendenza media superiore a 1%; aree edificate e zone di espansione, zone di forte sviluppo costruttivo, zone da rappresentarsi alla scala 1:1000.

Sorgente dei dati: scanner laser con controllo fotogrammetrico, CT 1:1000.

II.1.9.6 Specifiche per il livello 5

Tipologia DEM o DSM

Precisione in quota: in campo aperto $P_{Q(a)} = 0.20$ m
con copertura arborea > 70% $P_{Q(b)} = 0.40$ m (nel caso di DEM)
edifici (nel caso di DSM) $P_{Q(c)} = 0.27$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{Q(a)} = 0.40$ m
con copertura arborea > 70% $T_{Q(b)} = 0.80$ m (nel caso di DEM)
edifici (nel caso di DSM) $T_{Q(c)} = 0.54$ m

Errore sistematico altimetrico massimo $ES_{max} = 0.10$ m

Precisione planimetrica: $P_{EN} = 0.20$ m (0.2 mm alla scala 1:1000);

Tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 0.40$ m

Passo di griglia 2 m

Breakline o punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno maggiori di 0.30 m entro una maglia del grigliato.

Breakline necessarie per i seguenti oggetti: limiti delle strade (possibilmente ciglio stradale e del piede della scarpa), dighe (ciglio e piede), ponti, viadotti, linee di costa di laghi, fiumi e mari, impluvi; le *breakline* devono seguire il terreno con la precisione sopra specificata.

Delimitazione delle aree non rappresentabili (zone morte+): edifici, specchi d'acqua, zone di minor precisione per densa vegetazione. Le linee di delimitazione devono indicare la quota del terreno, altrimenti (ad es. se appartenenti ad un tetto) devono avere quota convenzionale; gli specchi d'acqua devono seguire il terreno.

Delimitazione della zona rappresentata sempre presente

Applicazioni principali: modellazione idraulica delle zone esondabili; applicazioni ingegneristiche; ortofoto ordinarie fino alla scala 1:500.

Area di applicazione: Aree a rischio di inondazione aventi pendenza media inferiore a 1%; zone da rappresentarsi alla scala 1:500.

Sorgente dei dati: scanner laser con controllo fotogrammetrico, CT 1:500.

II.1.9.7 Specifiche per il livello 6

Tipologia DDEM o DDSM

Precisione in quota: in campo aperto $P_{Q(a)} = 0.30$ m

copert. arborea >70%, arbusti >50 % (nel caso di DEM) $P_{Q(b)} = 0.60$ m

edifici (nel caso di DSM) $P_{Q(c)} = 0.40$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{Q(a)} = 0.60$ m

Copert. arborea > 70% e arbusti >50 % (nel caso di DEM) $T_{Q(b)} = 1.20$ m,

edifici (nel caso di DSM) $T_{Q(c)} = 0.80$ m

Errore sistematico altimetrico massimo $ES_{max} = 0.15$ m

Precisione planimetrica: $P_{EN} = 0.30$ m (0.15 mm alla scala 1:2000);

Tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 0.60$ m

Passo di griglia 1 m

Occorre la definizione di *breakline* solamente per linee di costa di laghi, fiumi e mari.

Delimitazione delle aree non rappresentabili (zone morte+): specchi d'acqua, zone di minor precisione per densa vegetazione. Le linee di delimitazione devono indicare la quota del terreno; gli specchi d'acqua devono seguire il terreno.

Delimitazione della zona rappresentata sempre necessaria

Applicazioni principali: Modellazione idraulica delle zone esondabili; applicazioni ingegneristiche; ortofoto ordinaria fino alla scala 1:1000, ortofoto di precisione fino alla scala 1:5000.

Area di applicazione: Aree a rischio di inondazione aventi pendenza media inferiore a 1%; zone da rappresentarsi alla scala 1:2000.

Sorgente dei dati: scanner laser con controllo fotogrammetrico, CT 1:2000-1:1000

II.1.9.8 Specifiche per il livello 7

Tipologia DDTM, DDEM o DDSM

Precisione in quota: in campo aperto $P_{Q(a)} = 0.15$ m

copert. arborea >70%, arbusti >50 % (nel caso di DEM) $P_{Q(b)} = 0.25$ m

edifici (nel caso di DSM) $P_{Q(c)} = 0.20$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{Q(a)} = 0.30$ m

copert. arborea > 70% e arbusti >50 % (nel caso di DEM) $T_{Q(b)} = 0.60$ m,

edifici (nel caso di DSM) $T_{Q(c)} = 0.40$ m

Errore sistematico altimetrico massimo $ES_{max} = 0.08$ m

Precisione planimetrica: $P_{EN} = 0.15$ m (0.15 mm alla scala 1:1000);

Tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 0.30$ m

Passo di griglia 0.50 m

Occorre la definizione di *breakline* solamente per linee di costa di laghi, fiumi e mari.

Delimitazione delle aree non rappresentabili (%zone morte+): specchi d'acqua, zone di minor precisione per densa vegetazione. Le linee di delimitazione devono indicare la quota del terreno, gli specchi d'acqua devono seguire il terreno.

Delimitazione della zona rappresentata sempre necessaria

Applicazioni principali: Modellazione idraulica delle zone esondabili; applicazioni ingegneristiche; ortofoto ordinaria fino alla scala 1:500, ortofoto di precisione fino alla scala 1:2000.

Area di applicazione: aree a rischio di inondazione aventi pendenza media inferiore a 1%; zone da rappresentarsi a grande e grandissima scala (1:2000, 1:1000, 1:500).

Sorgente dei dati: scanner laser con controllo fotogrammetrico, CT 1:1000-1:500.

II.1.9.9 Specifiche per il livello 8

Tipologia DDEM o DDSM

Precisione in quota: in campo aperto $P_{Q(a)} = 0.10$ m

copert. arborea >70%, arbusti >50 % (nel caso di DEM) $P_{Q(b)} = 0.15$ m

edifici (nel caso di DSM) $P_{Q(c)} = 0.13$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{Q(a)} = 0.20$ m

Copert. arborea > 70% e arbusti >50 % (nel caso di DEM) $T_{Q(b)} = 0.30$ m,

edifici (nel caso di DSM) $T_{Q(c)} = 0.26$ m

Errore sistematico altimetrico massimo $ES_{max} = 0.05$ m

Precisione planimetrica: $P_{EN} = 0.10$ m (0.2 mm alla scala 1:500);

Tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 0.20$ m

Passo di griglia 0.10-0.20 m

Occorre la definizione di *Breakline* solamente per linee di costa di laghi, fiumi e mari.

Delimitazione delle aree non rappresentabili (%zone morte+): specchi d'acqua, zone di minor precisione per densa vegetazione. Le linee di delimitazione devono indicare la quota del terreno, gli specchi d'acqua devono seguire il terreno.

Delimitazione della zona rappresentata sempre presente.

Applicazioni principali: Modellazione idraulica delle zone esondabili; applicazioni ingegneristiche; ortofoto ordinarie fino alla scala 1:500, ortofoto di precisione fino alla scala 1:500.

Area di applicazione: aree a rischio di inondazione aventi pendenza media inferiore a 1%; zone da rappresentarsi a grandissima scala (1:1000-1:500).

Sorgente dei dati: integrazione tra scanner laser e fotogrammetria, CT 1:500 e/o carta dei tetti alla stessa scala, laser scanner terrestre, tecniche di rilievo dirette (livellazione geometrica, GNSS e tecniche celerimetriche moderne)

II.1.10 LE VERIFICHE DI QUALITÀ

Le modalità di verifica di qualità in base al controllo di qualità si articolano essenzialmente in due fasi:

- Verifiche di qualità interna
- Verifiche sul prodotto finale.

II.1.10.1 Le verifiche di qualità interna

Le verifiche di qualità interna presuppongono il controllo di qualità di ciascuna fase operativa in cui si articola la produzione dei dati topografici, in genere eseguite in corso d'opera. Tali verifiche sono in buona parte legate alle varie tecniche produttive e possono essere solo in parte standardizzate in termini generali: nell'ambito di questo progetto sono state compilate apposite schede di descrizione delle varie tecniche di produzione in cui sono contenute le modalità per svolgere questi controlli.

Si indicano comunque due controlli di qualità interna che permettono una verifica preliminare di un modello altimetrico.

II.1.10.1.1 Il controllo di densità e completezza

Rispetto alla griglia del modello altimetrico, si valuta la densità dei punti presenti nel modello, mediante semplice conteggio dei punti contenuti entro una circonferenza di raggio pari al passo della griglia o per mezzo della *Chamfer function* (Borgefors, 1986).

Si valuta così anche la completezza del modello altimetrico, in quanto si mettono in evidenza le zone del modello altimetrico dove la densità (o la *chamfer distance*) risulta nulla.

II.1.10.1.2 Controllo dell'assenza di blunders

Nel caso di modelli altimetrici sotto forma di grigliati regolari, l'assenza di errori grossolani di rilevante entità (*blunders*) viene valutata tramite il calcolo della differenza tra la quota del nodo centrale di una finestra mobile di ampiezza assegnata e la mediana delle quote della finestra medesima. Tale valore viene confrontato con soglie massime definite in modo opportuno corrispondenti al massimo dislivello locale presente all'interno del territorio descritto dal modello altimetrico da verificare. Nel caso di DSM, si potrà per esempio considerare l'altezza massima degli edifici presenti in una area edificata, la massima altezza dei viadotti, ecc.

Può essere necessario ripetere l'analisi con finestre mobili di ampiezze diverse, a partire da finestre anche piuttosto estese (ad es. 9x9 o 11x11)

II.1.10.2 Le verifiche di qualità sul prodotto finale

La seconda fase di verifica della qualità, da eseguire al termine della produzione come verifica dei risultati prodotti, si attua mediante la determinazione di una rete di punti di controllo (*Check Point*, CP) caratterizzata da precisione più elevata rispetto ai dati da verificare: in particolare i CP dovranno essere determinati mediante tecniche di misura che garantiscano accuratezza (σ_{CP}) di almeno un ordine di grandezza più piccola rispetto alle tolleranze prefissate, ovvero: $\sigma_{CP,Q} < 1/10 \cdot T_Q$, $\sigma_{CP,EN} < 1/10 \cdot T_{EN}$.

È consentito l'utilizzo di vertici geodetici esistenti (IGM95 o caposaldi di livellazione) qualora soddisfino le accuratezze indicate al paragrafo precedente.

Le verifiche devono essere estese su almeno il 2% dell'area del modello altimetrico prodotto, scegliendo almeno 20 zone distribuite in modo uniforme su tutta l'area d'intervento e aventi caratteristiche omogenee di copertura del suolo, coerentemente alle tolleranze altimetriche fissate (campo aperto, alberatura > 70% e arbusti > 50%, edifici).

Per ogni zona devono essere posizionati almeno 20 CP e, nel complesso, per ogni tipologia di copertura del suolo devono essere rilevati almeno 100 CP.

A discrezione della Direzione dell'Esecuzione sentito il Collaudatore, è possibile estendere le verifiche fino al 4% dell'area del modello altimetrico prodotto seguendo regole analoghe.

Indicando con:

- n il numero di punti di controllo (CP);
- $Q_{CP,i}$ le quote dei punti di controllo;
- $\sigma_{CP,Q}$ lo scarto quadratico medio delle quote dei punti di controllo;

si determina il valore dell'errore lineare al 95 % di probabilità dei punti di controllo $LE95_{CP}$:

$$LE95_{CP} = 1.96 \sigma_{CP,Q}.$$

Indicando con $Q_{MA,i}$ le quote dei punti del modello altimetrico corrispondenti ai punti di controllo, si determina il valore dell'errore lineare al 95 % di probabilità del modello altimetrico $LE95_{MA}$:

$$LE95_{MA} = 1.96 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{MA,i} - Q_{CP,i})^2}{n}}.$$

Si determina pertanto il valore dell'errore lineare complessivo $LE95_Q$ che deve risultare minore della tolleranza in quota fissata T_Q .

$$LE95_Q = \sqrt{LE95_{MA}^2 + LE95_{CP}^2} \leq T_Q$$

La verifica deve essere effettuata per le zone di tipo a (terreno aperto), b (copertura arborea > 70%, arbusti > 50 %, solamente nel caso di DEM) e c (edifici, solamente nel caso di DSM) con le rispettive tolleranze ($T_{Q(a)}$, $T_{Q(b)}$ e $T_{Q(c)}$).

II.1.10.2.1 La verifica degli errori sistematici

Presi n punti di controllo, si calcola la media campionaria m che esprime la stima della componente sistematica.

La componente sistematica m calcolata sui punti di controllo non dovrà superare i valori massimi ES_{max} contenuti in II.1.9 per il livello del modello altimetrico da verificare.

Per l'affidabilità della verifica, la componente sistematica m dovrà essere calcolata su una serie di almeno 30 CP rilevati come in II.1.10.2.

II.1.10.2.2 La verifica globale

Qualora si ritenga necessario approfondire le verifiche previste in precedenza, è possibile valutare l'accuratezza complessiva rispetto a un modello altimetrico assunto come riferimento. Tale modello di riferimento deve ovviamente avere caratteristiche di precisione molto migliori ($P_{Qr} \text{ ml}/5 * P_Q$) rispetto al modello altimetrico da verificare.

È possibile procedere secondo due strade differenti:

- se non ci sono dubbi circa la corretta georeferenziazione tridimensionale del modello altimetrico da verificare, è possibile effettuare la valutazione delle differenze in quota (la cosiddetta valutazione 2.5D, implementata in tutti i *software* commerciali) che porta al confronto con le tolleranze indicate $T_{Q(x)}$ come in II.1.10.2. L'unica differenza rispetto al punto II.1.10.2 è sostanzialmente la numerosità del campione distribuito su tutto il modello altimetrico;
- se esiste la possibilità che il modello altimetrico non sia correttamente georeferenziato in termini tridimensionali, è necessario effettuare la valutazione complessiva delle differenze tra i due modelli altimetrici (da verificare e di riferimento) intesi come due superfici 3D. Per questo motivo non è sufficiente una semplice valutazione della differenza tra le quote dei due modelli altimetrici, ma è necessario stimare una trasformazione tridimensionale che leghi le due superfici e ne restituisca le distanze euclidee (D). È possibile in questo modo mettere in evidenza gli eventuali sistematismi presenti e verificare che le distanze euclidee D siano minori delle tolleranze indicate in II.1.9 per il livello del modello altimetrico da verificare, come in II.1.10.2.

II.1.10.2.3 La verifica delle breakline

Anche le linee caratteristiche dei modelli altimetrici possono essere verificate secondo due modalità.

La prima prevede la verifica della completezza ovvero che tutte le *breakline* richieste siano state inserite nel modello altimetrico.

La seconda prevede la verifica della correttezza (precisione) effettuando una campagna di rilevamento mediante tecniche di rilievo caratterizzate da precisione più elevata rispetto ai dati da verificare: in particolare i CP dovranno essere determinati mediante tecniche di misura che garantiscano accuratezza (σ_{CP}) di almeno un ordine di grandezza più piccola rispetto alle tolleranze prefissate, ovvero: $\sigma_{CP,EN} < 1/10 * T_{EN}$.

Le verifiche devono essere estese su almeno il 2% dell'area del modello altimetrico prodotto, scegliendo almeno 10 zone distribuite in modo uniforme su tutta l'area d'intervento. Per ogni zona devono essere posizionati almeno 10 CP corrispondenti a punti significativi di controllo lungo i tracciati contenuti nel modello altimetrico. Nel complesso, devono essere rilevati almeno 100 CP.

A discrezione della Direzione dell'Esecuzione, sentito il Collaudatore, è possibile estendere le verifiche fino al 4% dell'area del modello altimetrico prodotto seguendo regole analoghe.

La verifica si determina secondo la procedura seguente. Indicando con:

- n il numero di punti di controllo;
- $E_{CP,i} \ N_{CP,i}$ le coordinate planimetriche dei punti di controllo;

- $\sigma_{CP,E}$ $\sigma_{CP,N}$ gli scarti quadratici medi delle coordinate planimetriche dei punti di controllo derivanti dal metodo di determinazione utilizzato;

si determina il valore del *circular error* al 95 % di probabilità dei punti di controllo $CE95_{CP}$:

$$CE95_{CP} = 1.7308 \sqrt{\sigma_{CP,E}^2 + \sigma_{CP,N}^2}.$$

Indicando con $E_{BR,i}$, $N_{BR,i}$ le coordinate dei punti del modello altimetrico corrispondenti ai punti di controllo, si determina il valore del *circular error* al 95 % di probabilità del modello altimetrico $CE95_{BR}$:

$$CE95_{BR} = 1.7308 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{BR,i} - E_{CP,i})^2 + (N_{BR,i} - N_{CP,i})^2}{n}}.$$

Si determina pertanto il valore dell'errore lineare complessivo $CE95_{EN}$ che deve risultare minore della tolleranza in planimetria fissata T_{EN} .

$$CE95_{EN} = \sqrt{CE95_{BR}^2 + CE95_{CP}^2} \leq T_{EN}$$

II.2 PRESCRIZIONI PER L'USO DI CARTOGRAFIA NUMERICA PRE-ESISTENTE

II.2.1 INTRODUZIONE

La produzione di modelli altimetrici può anche avvenire senza l'ausilio di costose e sofisticate strumentazioni necessari per le tecniche fotogrammetriche e LiDAR. Infatti, spesso gli enti territoriali dispongono già di una cartografia numerica del territorio che gestiscono e che, a tutti gli effetti, può consentire la produzione di modelli altimetrici.

Questo metodo è decisamente più veloce ed economico, offre il vantaggio di essere utilizzabile con strumentazioni sostanzialmente semplici (PC standard), purché dotati comunque di strumenti *software* che applichino tecniche di interpolazione raffinate.

A differenza delle operazioni che prevedono l'utilizzo di cartografia al tratto, nel caso di cartografia numerica non si ha un degrado della precisione del dato primario e quindi in definitiva rispetto alla "verità terreno".

Le principali condizioni che devono essere tenute in conto sono sostanzialmente:

- la precisione, in quanto la carta numerica disponibile deve essere stata realizzata ad una scala nominale adeguata rispetto al livello di modello altimetrico che si vuole generare in modo da garantire il rispetto delle tolleranze prefissate e la ricchezza di dettagli necessaria;
- il contenuto della carta numerica deve essere sostanzialmente tridimensionale o per lo meno contenere tutti i dati che sono necessari per la generazione del modello altimetrico (punti quotati, curve di livello, *breakline*) come descritto nel seguito;
- lo stato di aggiornamento della carta numerica disponibile deve essere sufficiente in modo da garantire un dato attuale: una carta obsoleta non merita lo sforzo della sua digitalizzazione perché il prodotto ottenuto avrà un grado di aggiornamento insufficiente.

Si consiglia quindi l'utilizzo di questa tecnica per aree territoriali che siano poco soggette a nuove edificazioni o modificazioni di strutture esistenti, come per esempio i centri storici delle città. Infatti, in queste zone è generalmente disponibile un dato cartografico numerico a grande o grandissima scala (anche fino alla scala nominale 1:500) che ha richiesto un ingente impegno economico per la sua produzione, ed è spesso corredato da dati supplementari come la descrizione volumetrica degli edifici o ancora meglio, la carta dei tetti.

Un dato simile è molto adatto per la generazione di modelli digitali densi di superficie (DDSM) che descrivono con elevato grado di dettaglio sia il terreno che gli edifici anche in situazioni edificatorie particolarmente fitte e risulta la soluzione ottimale per generare ortofoto di precisione a grande e grandissima scala dei territori urbanizzati, compresi i centri storici.

In questo capitolo si descriveranno le caratteristiche che deve avere una carta numerica per permettere la produzione di un modello altimetrico corretto e le relative norme procedurali per la produzione. I riferimenti a precisioni, tolleranza, contenuti e altri standard più generali dei

modelli altimetrici sono contenuti in II.1. Le terminologie e gli acronimi sono definiti nella parte V.

II.2.2 CARATTERISTICHE DELLA CARTA NUMERICA UTILIZZATA

II.2.2.1 Il sistema di riferimento

Il sistema di riferimento della cartografia numerica disponibile talvolta non corrisponde a quello stabilito in II.1.4. Occorre pertanto trasformare la cartografia disponibile nel sistema di riferimento cartografico più attuale in modo da renderlo coerente con le specifiche II.1.4.

Allo scopo devono essere utilizzate le procedure ufficiali messe a punto dagli Enti Cartografici dello Stato come per esempio il *software* Verto e i grigliati relativi messi a punto dall'IGM nella versione più attuale.

II.2.2.2 Contenuto della cartografia

La carta numerica disponibile deve essere tridimensionale e avere le seguenti caratteristiche:

- devono essere presenti i punti quotati e le curve di livello per la descrizione della superficie del terreno;
- se tutte le entità presenti sono tridimensionali sono disponibili molte informazioni altimetriche aggiuntive che permettono la definizione più corretta del modello altimetrico;
- devono essere presenti la gran parte delle *breakline* necessarie per il livello di modello altimetrico da generare II.1.9: questo aspetto non è generalmente un problema in quanto in cartografia sono spesso presenti informazioni molto più complete rispetto alle sole linee di discontinuità richieste;
- se si vuole generare un modello di superficie (DDSM sia ordinario sia denso) devono essere presenti informazioni dettagliate circa la descrizione volumetrica degli edifici.

II.2.2.3 La precisione richiesta

La scala nominale della cartografia deve garantire le tolleranze richieste per il livello previsto in II.1.9 del modello altimetrico da produrre. A questo scopo, è necessario analizzare il capitolato speciale d'appalto che ha guidato la produzione e il collaudo della carta numerica. Infatti, in Italia non esistono norme standard per la produzione di cartografia numerica e quindi le informazioni contenute nella cartografia possono essere caratterizzate da precisioni (e quindi tolleranze) differenti, in particolare proprio dal punto di vista altimetrico.

In mancanza di informazioni più dettagliate è possibile utilizzare la Tabella 7 che indica la scala nominale della cartografia numerica disponibile, necessaria per la produzione dei vari livelli di modello altimetrico.

II.2.3 LA VERIFICA PRELIMINARE DEL LIVELLO DI AGGIORNAMENTO

Prima di iniziare le operazioni di generazione del modello altimetrico, è bene effettuare una verifica del livello di aggiornamento della cartografia numerica esistente.

È necessario selezionare una zona pari al 5 % dell'area del modello altimetrico da generare ed effettuare una ricognizione sul terreno in modo da mettere in evidenza le modifiche che sono avvenute. Tali modifiche devono essere valutate in base al tipo di modello altimetrico che deve essere generato:

- per un DEM si valutano essenzialmente le variazioni del terreno e delle *breakline* relative;
- per un DSM occorrerà analizzare anche le variazioni nell'edificato e nelle infrastrutture stradali e ferroviarie (ponti, viadotti, ecc.).

Livello modello altimetrico	Scala nominale carta numerica
0	1:50000
1	1:25000
2	1:10000
3	1:5000
4	1:2000
5	1:1000
6	1:2000
7	1:1000
8	1:500

Tabella 7 - Relazione tra scala della cartografia e i livelli di modello altimetrico

II.2.4 L'ACQUISIZIONE DATI PER I MODELLI ALTIMETRICI DA CARTOGRAFIA NUMERICA ESISTENTE

II.2.4.1 Generazione di un DEM

La procedura di generazione di modelli altimetrici del terreno prevede la generazione di un seminato di punti (A) generato nel modo seguente:

- estrazione dalla carta numerica di punti quotati;
- estrazione dalla carta numerica dei punti che descrivono le curve di livello;
- estrazione di punti aggiuntivi da altri elementi significativi tridimensionali (strade, edifici al piede, etc.);
- eliminazione di punti quotati posti su ponti e viadotti.

Dalla carta numerica vengono poi estratte le *breakline* necessarie in funzione del livello di modello altimetrico da generare (II.1.9) e i vertici che le descrivono vengono aggiunti all'insieme di punti (A).

Mediante il seminato irregolare di punti (A) si genera il modello a triangoli (TIN) che tenga conto delle *breakline* (ovvero i triangoli non possono essere a cavallo delle *breakline*) mediante triangolazione di Delaunay (I.1).

In base al TIN, si determina il DEM regolarizzato alla maglia voluta secondo gli standard di riferimento (II.1.9) anche in versione densa.

È possibile definire altri metodi di interpolazione (*Natural Neighbour*, *Spline*, *Kriging*, ecc.) , da stabilirsi con la Direzione dell'Esecuzione, sentito il Collaudatore.

II.2.4.2 Generazione DSM normale o denso

Per generare il modello altimetrico di superficie sia ordinario che denso, è necessario innanzitutto produrre il DEM, secondo le regole descritte in precedenza.

In seguito, si sostituiscono i valori di quota dei nodi interessati dalle entità che descrivono la superficie più elevata:

- i ponti e i viadotti sono descritti in cartografia come entità areali con codici specifici. La loro descrizione in termini di DSM si realizza seguendo i passi seguenti:
 - per ogni entità avente codifica ponte o viadotto, si legge l'elemento geometrico di contorno;
 - si memorizzano le coordinate plano-altimetriche dei vertici del contorno (insieme B);
 - si estraggono dalla cartografia numerica i punti quotati interni all'entità selezionata e si aggiungono all'insieme B;
 - si riempiono tutti i nodi del DSM interni all'entità areale considerata mediante una interpolazione tra i punti dell'insieme B;
- Gli edifici sono descritti in cartografia mediante entità areali denominate entità volumetriche. Per ogni entità volumetrica sono presenti in genere due punti quotati interni all'area stessa che definiscono con codifica specifica la quota media al piede dell'entità volumetrica e la sua quota in gronda. Si può così effettuare una modellazione a cassone, descrivendo ogni edificio come un parallelepipedo con altezza costante pari alla quota in gronda. Quindi, la descrizione delle entità volumetriche in termini di DSM si realizza seguendo i passi seguenti:
 - per ogni entità volumetrica, si estrae la polilinea chiusa di contorno;
 - si ricerca all'interno della polilinea di contorno, il punto quotato in gronda;
 - si riempiono tutti i nodi del DSM interni alla polilinea di contorno dell'entità volumetrica con la quota in gronda.
- Le tettoie sono descritte in cartografia mediante entità areali i cui vertici hanno quota pari alla quota in gronda della tettoia stessa. La loro descrizione in termini di DSM si realizza seguendo i passi seguenti:
 - per ogni tettoia, si estrae la polilinea chiusa di contorno;
 - si memorizzano le coordinate dei vertici della polilinea di contorno nell'insieme C;
 - si riempiono tutti i nodi del DSM interni alla polilinea di contorno dell'entità tettoia con una quota interpolata utilizzando i punti dell'insieme B.

Nel caso di edifici artistici, monumentali o particolarmente articolati il modello indicato a cassone non funziona bene. Occorre integrare le informazioni presenti in cartografia con un dettaglio maggiore, qual è quello fornito da una carta dei tetti. In questo caso il DSM può essere prodotto secondo le specifiche descritte nel punto successivo.

II.2.4.3 DDSM derivato dalla carta dei tetti

Si utilizza la rappresentazione dei tetti degli edifici (vedi carta dei tetti in I.1) mediante entità areali che descrivono le singole falde. Ogni falda viene indicata con una polilinea di contorno 3D in cui ogni vertice viene posto all'effettiva quota in cui si trova sul contorno del tetto da descrivere. Le falde sono da considerarsi come entità piane.

In genere la rappresentazione viene completata mediante la retta di massima pendenza posta all'interno dell'entità areale con la freccia che indica il verso della pendenza della falda: tale retta può essere descritta solo in planimetria ma anche in 3D a seconda dei dettami del capitolato con cui è stata prodotta.

Nel caso di coperture complesse, si semplifica generalmente la superficie da descrivere mediante maglie triangolari o quadrilateri sufficientemente dense in modo da garantire il rispetto delle tolleranze. Ogni maglia viene considerata come una falda.

Pertanto, il modello di superficie è ricavato nel modo seguente:

- per ogni falda presente sulla carta dei tetti, si estraggono i vertici della polilinea di contorno che vanno a formare l'insieme D;
- se sono presenti le rette di massima pendenza 3D, si estraggono anche i vertici di tali rette e si uniscono i punti derivanti all'insieme D;
- si stima ai minimi quadrati un piano medio passante per i punti presenti nell'insieme D;
- per tutti i nodi del DSM interni alla falda considerata, si determina la quota mediante interpolazione sul piano medio di falda stimato.

II.2.5 IL CONTROLLO DI QUALITÀ

Il controllo di qualità viene eseguito al termine dei lavori, verificando la corrispondenza del prodotto finale con i requisiti definiti.

Si rimanda alle procedure di verifica contenute in II.1.9.

II.3 PRESCRIZIONI PER L'UTILIZZO DELLE TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE

La fotogrammetria è stata fino ad alcuni anni fa, la tecnica principale per la produzione di modelli altimetrici a piccola, media e grande scala. Grazie al costante miglioramento degli algoritmi e delle tecniche esecutive (georeferenziazione diretta, autocorrelazione, camere digitali aeree ecc.), le tecniche fotogrammetriche mantengono un importante ruolo nella produzione di modelli altimetrici.

Il presente capitolo ha l'obiettivo di definire le prescrizioni tecniche di dettaglio da seguire per la produzione di modelli altimetrici mediante tecniche fotogrammetriche (sia manuali che automatiche) e per la verifica di qualità in corso d'opera e finale. Per quanto riguarda la definizione degli standard di riferimento si rimanda al capitolo specifico II.1.9.

Per quanto riguarda la definizione dei termini utilizzati si rimanda al I.1.

II.3.1 GENERALITÀ SULL'IMPIEGO DELLA FOTOGRAMMETRIA

I metodi fotogrammetrici offrono una grande varietà di opzioni per la derivazione di un modelli altimetrici: misura per punti sparsi, tracciamento di profili, correlazioni di immagini, restituzione delle linee caratteristiche del terreno. La massima efficienza si ottiene adottando procedure fortemente automatizzate, in particolare nella triangolazione aerea e nell'acquisizione dati per i modelli altimetrici. Resta comunque inteso che questi procedimenti automatizzati richiedono un accurato controllo di qualità.

In generale, la precisione della determinazione fotogrammetrica del DEM in terreno aperto è pari a circa $0.2\% - 0.3\%$ della quota relativa di volo nel caso di utilizzo di camera analogica.

La fotogrammetria è comunque alquanto condizionata dalla copertura vegetale: nelle aree boschive la precisione è notevolmente inferiore.

Un ulteriore incremento nell'automazione del processo è disponibile, da alcuni anni, grazie alla disponibilità di tecniche di georeferenziazione diretta che semplificano le operazioni di appoggio a terra e all'introduzione sul mercato di camere digitali a grande formato per piattaforma aerea, descritte in IV.1.

II.3.2 L'ACQUISIZIONE DEI DATI PER I MODELLI ALTIMETRICI

La fotogrammetria offre una vasta gamma di prodotti e metodi di lavoro. Equa procedura standard per la produzione di carte numeriche, la elaborazione di ortofoto e la derivazione di modelli digitali del terreno. La maggior efficienza tecnico-economica si ottiene derivando più prodotti all'interno del medesimo progetto, dal momento che la presa e l'orientamento dei fotogrammi (inclusi i punti di appoggio e le operazioni di triangolazione aerea quando necessarie) hanno costi rilevanti.

Le procedure fotogrammetriche sono usate principalmente per i Livelli di precisione 0÷3, ma si possono adattare a tutti i livelli. Chiaramente il primo standard di qualità da stabilire sarà il livello di modello altimetrico che dovrà essere prodotto.

II.3.2.1 Le fasi operative

Il procedimento standard per la determinazione dei modelli altimetrici per via fotogrammetrica comprende le seguenti fasi:

1. pianificazione delle procedure operative;
2. pianificazione ed esecuzione del volo stereoscopico;
3. scansione dei fotogrammi (qualora non siano già digitali ovvero acquisiti con camere digitali);
4. pianificazione della distribuzione dei punti di appoggio e loro determinazione;
5. orientamento delle immagini mediante triangolazione aerea (se non già acquisite con tecniche di fotogrammetria diretta);
6. determinazione del modello altimetrico mediante correlazione automatica di immagini;
7. editing manuale dei risultati della correlazione, completamento manuale al restitutore e in campagna e controllo di qualità;
8. trasformazione dei dati del modello altimetrico nel formato finale.

II.3.2.2 Pianificazione delle fasi del lavoro e del controllo di qualità

Le procedure fotogrammetriche sono alquanto complesse ed è importante pianificare attentamente le singole fasi operative, la tempistica dei lavori e quella del controllo qualità da parte del Committente e della Ditta. Questo punto riveste particolare importanza in quanto non sempre il lavoro viene eseguito da una unica ditta ed è necessario coordinare i compiti dell'appaltatore principale e dei subappaltatori. È necessario che ogni fase sia controllata accuratamente da parte delle imprese e che il committente abbia a disposizione la documentazione necessaria per un controllo di qualità indipendente e accurato.

Questa fase di pianificazione deve inoltre includere il coordinamento con gli altri eventuali filoni del progetto, quali la elaborazione di ortofoto e la restituzione numerica vettoriale. La combinazione di diversi lavori permette infatti di ottimizzare i costi.

In questa fase vengono decise le procedure per la determinazioni dei parametri di orientamento esterno (triangolazione aerea manuale su restitutore analitico, triangolazione automatica o semi-automatica con fotogrammi digitali acquisiti direttamente o indirettamente con scansione dei fotogrammi, disponibilità o meno di parametri di orientamento esterno determinati mediante tecniche di georeferenziazione diretta) e per l'acquisizione dei dati del modello altimetrico (procedure automatiche basate su autocorrelazione di immagini o restituzione fotogrammetrica su restitutore digitale o analitico).

Verrà infine inclusa una valutazione dettagliata dei costi delle diverse fasi del lavoro. In linea generale la fase di pianificazione dovrebbe essere completata prima della presentazione di una offerta per l'appalto e la maggior parte dei suoi elementi dovrebbe essere incorporata nell'offerta. Di conseguenza, i seguenti elementi devono far parte dell'offerta:

- descrizione dettagliata della procedura operativa scelta;
- possibile coordinamento con altri progetti;
- calendario dei lavori;
- informazioni dettagliate sui subappaltatori, se non tutto il lavoro viene eseguito dall'appaltatore principale;
- descrizione dettagliata delle procedure di controllo della qualità, della loro tempistica e dei documenti messi a disposizione del committente per il controllo di qualità ;

- dati riassuntivi sui parametri del volo di ripresa e informazioni sulle procedure di appoggio (distribuzione approssimativa dei punti di appoggio e tecniche per la loro determinazione);
- costi delle singole operazioni, dettagliate per le varie fasi di lavoro.

In linea di principio il lavoro dovrebbe essere assegnato unicamente a imprese certificate secondo le norme ISO e ammesse alla presentazione di offerte dopo una pre-selezione. Le ditte ammesse avranno perciò dimostrato, in progetti simili, di essere tecnicamente in grado di eseguire il lavoro, di osservare le norme di qualità, rispettare il calendario dei lavori e mantenere i prezzi concordati.

Le modalità tecniche con cui verrà eseguito il lavoro devono essere rigorosamente conformi a quanto indicato dalla Ditta in fase di Progetto, salvo eventuali proposte migliorative sottoposte per iscritto al Direttore dell'Esecuzione che, sentito il Collaudatore, le approverà per iscritto preventivamente all'esecuzione della variante.

In ogni caso, esse non potranno giustificare aumenti nei prezzi o dilazioni nei tempi di consegna.

II.3.2.3 Il volo fotogrammetrico

Fattori chiave per la determinazione del modello altimetrico per via fotogrammetrica sono la scala fotogramma, la percentuale di ricoprimento tra i fotogrammi, il periodo di volo previsto e la distribuzione dei punti di appoggio sul terreno.

Le riprese aerofotogrammetriche dovranno essere eseguite a colori e dovranno garantire la copertura stereoscopica corretta di tutto il territorio da rilevare e dovranno avere i requisiti propri della tecnica più aggiornata per l'esecuzione dei rilievi aerofotogrammetrici. Non è ammesso l'utilizzo di voli fotogrammetrici antecedenti la data dell'incarico.

II.3.2.3.1 Caratteristiche dei velivoli

All'atto dell'esecuzione del volo, la Ditta verificherà la taratura e il funzionamento degli strumenti di volo e in particolare dell'altimetro di bordo. Il velivolo dovrà essere obbligatoriamente dotato di sistema di navigazione GNSS per poter eseguire correttamente il piano di volo progettato.

Nella realizzazione del volo è invece facoltativo l'impiego di:

- dispositivi inerziali (IMU) per l'acquisizione delle componenti angolari di presa;
- GNSS cinematico collegato in modo opportuno con la strumentazione di presa, al fine di determinare il posizionamento geodetico di precisione dei centri di presa.

II.3.2.3.2 Caratteristiche delle camere da presa

È ammesso l'utilizzo di camere metriche fotografiche o digitali. Tutte le riprese dovranno essere eseguite con una sola tipologia di camera (fotografica o digitale); è ammesso l'uso di diverse camere della medesima tipologia per la realizzazione del volo.

In ogni caso le camere dovranno essere dotate di certificati di calibrazione di data non anteriore a due anni dalla data di esecuzione del volo.

Il sistema di presa deve essere dotato di FMC (Forward Motion Compensation) per l'eliminazione del trascinamento (in particolare alle quote relative di volo più basse) e di cinederivometro per la correzione della deriva durante il volo.

II.3.2.3.3 Caratteristiche dei voli

Nel caso di utilizzo di camere metriche fotografiche si dovranno rispettare i parametri indicati in *Tabella 8* indicati in funzione del livello di modello altimetrico da produrre (vedi standard di riferimento).

Si suppone l'utilizzo di camera con obiettivo grandangolare (150 mm circa).

Livello	Prec. Quota (m)	Scala di rif. 1:	Fatt. molt	Scala Media	Variaz Amm. $\pm 10\%$	Scala min 1:	Scala max 1:	Obbligo FMC	Quota rel. volo media (m)	Quota rel. volo max (m)	Quota rel. volo min (m)
0	10,00	50000	1	50000	5000	55000	45000	no	7500	8250	6750
1	5,00	25000	1	25000	2500	27500	22500	no	3750	4125	3375
2	2,00	10000	2	20000	2000	22000	18000	no	3000	3300	2700
3	1,00	5000	3	15000	1500	16500	13500	no	2250	2475	2025
4	0,30	2000	4	8000	800	8800	7200	sì	1200	1320	1080
5	0,15	1000	5	5000	500	5500	4500	sì	750	825	675
6	0,30	2000	4	8000	800	8800	7200	sì	1200	1320	1080
7	0,15	1000	5	5000	500	5500	4500	sì	750	825	675
8	0,10	500	6	3000	300	3300	2700	sì	450	495	405

Tabella 8 - Parametri di volo in funzione del livello di modello altimetrico

Livello	Prec. in quota (m)	GSD min (m)	GSD med (m)	GSD max (m)
0	10,00	1,06	0,85	0,75
1	5,00	0,53	0,42	0,37
2	2,00	0,42	0,34	0,30
3	1,00	0,32	0,25	0,22
4	0,30	0,17	0,14	0,12
5	0,15	0,11	0,08	0,07
6	0,30	0,17	0,14	0,12
7	0,15	0,11	0,08	0,07
8	0,10	0,06	0,05	0,04

Tabella 9 - Il GSD da utilizzare nel caso di riprese con camera digitale

In analogia, per le camere digitali caratterizzate da una gran varietà di configurazioni geometriche (focale, risoluzione, abbracciamento) è necessario estendere le considerazioni precedenti secondo il parametro più generale definito dalla dimensione del *pixel* a terra (*Ground Sample Distance* = GSD).

Si supponga che le immagini analogiche siano acquisite in termini digitali alla risoluzione massima di 1800 dpi (considerato uno standard di mercato) e minima di 1200 dpi. Ne consegue che la Tabella 8 può essere espressa in termini di GSD nella Tabella 9, in cui sono contenuti i valori di GSD minimo e massimo per i vari livelli di modello altimetrico da produrre. In funzione della geometria della camera sarà così possibile scegliere la quota relativa di volo e i vari parametri del volo.

Il territorio potrà essere suddiviso in blocchi omogenei costituiti da insiemi di strisciate parallele. Il ricoprimento trasversale delle strisciate dovrà essere di norma pari al 20% e non potrà essere in nessun caso inferiore al 10%.

Nel caso in cui si utilizzino camere metriche fotografiche o camere digitali a prospettiva centrale unica:

- le variazioni, in valore assoluto, degli elementi angolari di orientamento dei fotogrammi adiacenti lungo ciascuna strisciata non dovranno mai superare 5 gon;
- il ricoprimento longitudinale fra fotogrammi di una stessa strisciata dovrà essere compreso fra il 55% e il 80%;
- il ricoprimento trasversale fra fotogrammi consecutivi della stessa strisciata non dovrà essere inferiore al 90%.

Nel caso in cui si utilizzino camere digitali push-broom è necessario che vengano rispettate le condizioni relative alla sovrapposizione trasversale: il ricoprimento trasversale delle strisciate dovrà essere di norma pari al 20% e non potrà essere in nessun caso inferiore al 10%.

In nessun punto dovranno comunque presentarsi soluzioni di continuità nella copertura stereoscopica delle zone assoggettate a ripresa.

I fotogrammi dovranno presentarsi nitidi e privi di foschia, di nubi e/o ombre da esse riportate e, per quanto possibile, di copertura nevosa.

11.3.2.3.4 Epoca dei voli

I voli dovranno essere eseguiti nelle ore a cavallo del mezzogiorno solare, in condizioni di raggi solari con elevazione non inferiore a 35°.

È necessario porre particolare attenzione nella scelta del periodo e dell'ora di volo, anche in funzione della tipologia di vegetazione prevalente: nel caso di costruzione del modello altimetrico con tecnica fotogrammetrica, deve essere prevista una corretta e completa costruzione del modello digitale anche nelle zone con fitta vegetazione: la presenza della vegetazione non può essere utilizzata come motivo per diminuire il livello di qualità metrica del prodotto finale.

La stagione di volo sarà generalmente l'estate (ammettendo quindi la presenza di fogliame) per il livello di precisione 0 e di preferenza senza fogli e per i livelli di precisione 1 o superiori.

11.3.2.3.5 Piano di volo

Prima di procedere all'esecuzione delle riprese aeree fotogrammetriche, la Ditta dovrà predisporre il piano di volo su base cartografica a scala 1:25.000 sul quale, per ogni strisciata, dovranno essere indicati:

- l'asse della strisciata, con i limiti (inizio e fine) della copertura stereoscopica;
- la sua codifica ipotizzata;
- la quota assoluta di volo prevista.

In una tabella allegata dovranno inoltre essere indicate, per ogni strisciata:

- la quota minima e la quota massima del terreno sorvolato;
- le corrispondenti scale minima e massima;
- nel caso si vogliano utilizzare le tecniche digitali, il GSD minimo e massimo.

Per la progettazione del piano di volo si consiglia l'impiego di un modello altimetrico approssimato a piccola scala (livello 0 o livello 1) relativo all'area da rilevare e di idonei strumenti *software* di progetto.

Nel caso si vogliano determinare i centri di presa con GNSS cinematico, è necessario eseguire delle strisciate trasversali, per lo meno alle estremità del blocco, per irrigidire il legame fotogrammetrico fra i centri di presa di strisciate differenti.

Il piano di volo dovrà essere sottoposto all'approvazione del Direttore dell'Esecuzione, sentito il Collaudatore, prima della realizzazione delle riprese.

II.3.2.3.6 Approntamento delle immagini in forma digitale

Se il ciclo produttivo si avvale di strumentazione digitale, i negativi dei fotogrammi dovranno essere sottoposti a digitalizzazione con una risoluzione uguale o superiore a 1200 dpi (*pixel* con dimensione inferiore a 21.2 μm).

La scansione deve essere effettuata con scanner di alta precisione, che garantisca una ripetibilità geometrica di almeno $\pm 3 \mu\text{m}$. Prima della scansione è necessaria una verifica della taratura dello scanner, sia per la geometria che per la radiometria, da eseguire all'inizio e alla fine del lotto e/o ogni 2 settimane e/o ogni 2000 scansioni.

Nel caso la cattiva taratura dello scanner non permettesse di ottenere la ripetibilità precedentemente definita la scansione non può essere accettata. Lo scanner deve quindi essere revisionato in modo da poter rispettare tali tolleranze.

È necessario adottare precauzioni per riprodurre adeguatamente i toni grigi delle immagini. Le sfumature importanti per il contenuto delle immagini (tetti di case, strade, prati, aree boschive, campi) devono essere riprodotte in modo che il disturbo presente nell'immagine non ne diminuisca la leggibilità. Pertanto il livello di rumore nei toni di grigio non deve superare l'equivalente di $\pm 0.05D$ per l'intera gamma dei toni di grigio, che in genere è compresa in un intervallo di densità fra 0.1 e 2D (o anche 3D, a seconda del tipo di fotogramma). Per i negativi con elevato contrasto, potrebbe essere necessario produrre i positivi e digitalizzare questi ultimi. Per fotogrammi a colori si dovrebbe utilizzare il profilo del colore definito dall'International Color Committee (ICC), in particolare se con gli stessi fotogrammi si vuole produrre l'ortofoto. La risoluzione geometrica appropriata dello scanner dovrebbe essere definita attraverso la funzione di trasferimento della modulazione. La perdita di contrasto dovrebbe restare inferiore al 20% per frequenze di 20 coppie di linee per millimetro. Il rispetto di questi requisiti (funzione di trasferimento della modulazione, basso disturbo dell'immagine e profilo del colore ICC) dovrebbe essere dimostrata con l'aiuto di speciali *target*.

Occorre fare attenzione a digitalizzare i fotogrammi sempre con il medesimo orientamento (ovvero con il *report* della camera sul medesimo lato).

La procedura di scansione deve poter essere verificabile: in fase di collaudo si controllerà che i file immagine siano ottenuti con risoluzione ottico-meccanica originale, cioè non abbiano subito alcun tipo di ricampionamento, in particolare quello atto a derivarli da una scansione a risoluzione inferiore.

Nel file originale non è ammesso alcun tipo di compressione del tipo *lossy*, e dovranno quindi essere consegnati in formato TIFF con compressione LZW.

II.3.2.3.7 Materiale da consegnare al termine del volo

La Ditta dovrà presentare a collaudo tutta la documentazione relativa al volo fotogrammetrico eseguito, e in particolare:

- relazione descrittiva in lingua italiana delle procedure seguite;

- % verbale di controllo di qualità interna del volo+ che contenga i punti indicati nei controlli di qualità;
- autocertificazione della data (o delle date) di effettuazione del volo;
- certificati di taratura delle camere da presa;
- documenti che testimonino il tipo di pellicola impiegata e la data di scadenza (solo nel caso di utilizzo di camere metriche fotografiche);
- grafico del volo alla scala 1:25.000, su carta lucida e su rotolo continuo per tutta la lunghezza delle strisciate, riportante le coperture dei fotogrammi alterni lungo le strisciate e l'indicazione del limite dell'area da rilevare;
- tre file in formato DXF (*Data Exchange Format* di Autodesk) o in formato SHP (*Shapefile* di Esri) contenenti le informazioni relative ai grafici di volo per l'intero territorio servito:
 - assi di volo
 - centri di presa
 - abbracciamento al suolo dei fotogrammi;
- adeguati supporti (*hard-disk* rimovibili, DVD, ò) contenenti le immagini digitali originali in formato TIFF/LZW.

II.3.2.4 Orientamento delle immagini

Ogni immagine prodotta dovrà essere opportunamente orientata nel sistema di riferimento specificato negli standard di riferimento II.1.4 secondo il procedimento proposto dalla Ditta.

Sono ammesse tutte le tecniche di orientamento, purché ampiamente sperimentate e opportunamente documentate: fotogrammetria diretta, triangolazione aerea con l'ausilio delle coordinate dei punti di presa ottenuti con GNSS cinematico, tradizionale Triangolazione Aerea (a fasci proiettivi o a modelli indipendenti) con appoggio a terra su punti noti, determinati con riferimento ai vertici della rete di inquadramento e raffittimento.

Al termine delle operazioni di orientamento, la Ditta consegnerà una relazione dettagliata contenente i tabulati dei parametri di orientamento, delle coordinate dei punti e dei parametri statistici necessari a definire la qualità dei risultati.

II.3.2.5 Generazione del modello altimetrico

Lo scopo di questa fase è l'acquisizione di un sufficiente numero di punti in grado di consentire la successiva formazione del modello altimetrico a maglia regolare, il rilievo delle *breakline* e dei punti quotati necessari.

Si possono utilizzare sia l'autocorrelazione automatica sia l'acquisizione fotogrammetrica manuale purché garantiscano le caratteristiche di precisione richieste. Allo scopo, si possono usare:

- restitutori analitici, opportunamente calibrati con data non anteriore ad un anno dalla data dei lavori;
- restitutori digitali, di comprovata efficacia e precisione.

Non è consentito utilizzare restitutori analogici encoderizzati.

II.3.2.5.1 Generazione automatica del modello altimetrico:

I metodi di correlazione automatica delle immagini possono costituire una tecnica efficiente di determinazione del modello altimetrico.

E tuttavia necessari o:

- prevedere un *editing* accurato, che richiede grande esperienza e capacità;
- controllare possibili differenze sistematiche tra le quote restituite dalla macchina e l'operatore incaricato dell'*editing*;
- provvedere al controllo e integrazione degli elementi lineari (*breakline...*) misurati.

Le tecniche e le procedure operative variano fortemente da un pacchetto *software* all'altro: di conseguenza, si richiede comunque alla ditta esecutrice di fornire una descrizione dettagliata dei metodi che intende applicare e di come intende garantire il controllo di qualità.

Qualora la tecnica automatica preveda la generazione di un seminato irregolare dei punti sarà necessario prevedere la generazione del TIN mediante triangolazione di Delaunay e la successiva regolarizzazione mediante tecniche di interpolazione comprovate.

Resta inteso che il risultato finale deve essere un reticolo di punti regolari con la compiezza di maglia indicata completato, ove necessario, dall'insieme delle *breakline*, delle aree morte e delle aree di minor precisione secondo i dettami definiti negli standard di riferimento.

II.3.2.5.2 Restituzione fotogrammetrica manuale

Se si utilizzano i restitutori analitici, visto che la procedura di orientamento delle immagini è in qualche modo diversa rispetto a quella con immagini digitali, è importante rideterminare correttamente gli elementi di orientamento come sopra indicato e controllarli con tutti i punti di appoggio e di legame presenti nel modello utilizzato.

In alternativa è possibile utilizzare i restitutori digitali.

Per la determinazione dei punti sparsi del modello altimetrico possono essere utilizzati i seguenti metodi:

- reticolo regolare;
- misura per profili;
- campionamento casuale;
- campionamento progressivo.

Quale metodo debba essere adottato dipende molto dall'esperienza e dalla capacità degli operatori. Anche in questo caso viene lasciato all'appaltatore il compito di fornire una descrizione dettagliata dei metodi da applicare e di come venga garantito il controllo di qualità.

Qualora la tecnica di acquisizione preveda la generazione di un seminato irregolare dei punti sarà necessario prevedere la generazione del TIN mediante triangolazione di Delaunay e la successiva regolarizzazione mediante tecniche di interpolazione comprovate.

Resta inteso che il risultato finale deve essere un reticolo a punti regolari con la compiezza di maglia indicata e, ove necessario, l'insieme delle *breakline*, delle aree morte e delle aree di minor precisione e di tutte le entità richieste negli standard di riferimento. Si dovrà fare grande attenzione ad evitare errori sistematici: a tale scopo devono essere documentati gli errori personali degli operatori e gli errori dovuti a variazioni nella temperatura ambiente.

II.3.2.6 Restituzione delle breakline

Il modello altimetrico deve essere integrato da *breakline*, linee caratteristiche e punti quotati per oggetti secondo le specifiche definite per il livello di modello altimetrico considerato (II.1.5.4 e II.1.9).

Tali elementi geometrici devono essere tracciati mediante restituzione fotogrammetrica manuale.

II.3.2.7 Materiale da consegnare al termine della generazione del modello altimetrico

La Ditta appaltatrice dovrà presentare al collaudo il seguente materiale:

- relazione descrittiva in lingua italiana delle procedure seguite;
- rapporto sui test di corretto funzionamento della strumentazione utilizzata e sulle verifiche eseguite sui dati acquisiti;
- un elenco del contenuto dei supporti di consegna (DVD, CD, ò) con l'indicazione della eventuale struttura in cartelle utilizzata;
- su adeguati supporti (DVD, CD, ò), per ciascuna porzione di modello altimetrico corrispondente al taglio in mappe utilizzato verranno consegnati i seguenti *file* secondo le norme indicate negli standard di riferimento:
 - metadati;
 - eventuali modelli intermedi (TIN, ò);
 - Modello altimetrico regolarizzato;
 - *breakline*, punti quotati rilevati *ad hoc*, delimitazioni e altre informazioni vettoriali di contorno
- I nomi dei file dovranno essere composti nel seguente modo: %headxò x.ext+, dove %ò x+ è il nome della mappa descritta secondo il taglio cartografico standardizzato, %ext+ è l'estensione che caratterizza il *file* e %head+ è una testa dipendente dal tipo di *file* secondo quanto specificato in .

Tipo del file	head
metadati	MTD_DEM
TIN	TIN
DEM generato	DEM
<i>breakline</i> , Å	BRK

Tabella 10 - Specificazione del prefisso del nome del file

II.3.3 IL CONTROLLO DI QUALITÀ

Come descritto in II.1.9 il controllo di qualità dovrà avvenire secondo due modalità:

- in corso d'opera analizzando e collaudando i risultati delle varie fasi operative, indicate nel seguito;
- al termine dei lavori verificando la corrispondenza del prodotto finale con i requisiti definiti.

Con riferimento al collaudo del volo stereoscopico, nel caso in cui vengano acquisite immagini metriche fotografiche, la digitalizzazione delle stesse non potrà avvenire se non dopo il collaudo positivo del volo così come descritto al punto successivo.

II.3.3.1 Controllo di qualità del volo stereoscopico

II.3.3.1.1 Il controllo di qualità interna

Immediatamente dopo il volo di ripresa la Ditta controllerà la qualità delle immagini e invierà una relazione al Committente. Il verbale di controllo di qualità interna del volo dovrà fornire informazioni, fra l'altro, sui seguenti punti:

- “ foschia e altri fattori che influenzano la qualità dell'immagine;
- “ controllo dei valori di densità ottica dei fotogrammi;
- “ controllo di nitidezza delle immagini;
- “ determinazione degli stiramenti della pellicola in alcuni fotogrammi significativi (inizio di una strisciata, inizio di un nuovo rullo di pellicola...)
- “ visibilità degli eventuali punti segnalizzati
- “ relazione tecnica generale, comprendente le specifiche fornite per l'esecuzione del volo di ripresa.
- “ rispetto del piano di volo, in particolare degli assi delle strisciate;
- “ sovrapposizione longitudinale e trasversale minima ed eventuali lacune nella copertura;
- “ lacune dovute a copertura nuvolosa;

In caso di inosservanza delle prescrizioni tecniche, il volo di ripresa deve essere ripetuto, parzialmente o interamente, in relazione ai difetti riscontrati.

II.3.3.1.2 Il collaudo del volo

Nel caso in cui siano state utilizzate camere metriche fotografiche, la Ditta appaltatrice dovrà eseguire, su indicazione del Collaudatore, la stampa delle diapositive di un numero di fotogrammi non superiore al 5% del totale: su di essi verranno stimati gli orientamenti relativi per la verifica dello spianamento della pellicola e la verifica delle variazioni dei parametri angolari di presa.

Sui medesimi fotogrammi verranno determinati i parametri di orientamento esterno al fine di verificare il rispetto delle prescrizioni di capitolato.

Nel caso in cui siano state utilizzate camere metriche digitali a prospettiva centrale unica, verranno eseguite le verifiche su un campione di immagini non superiore al 5%, al fine di verificare i valori assoluti e le variazioni tra fotogrammi contigui dei parametri angolari di orientamento esterno.

Nel caso in cui siano state utilizzate camere metriche digitali a prospettiva centrale multipla, il collaudo consisterà nell'analisi dei documenti di post-elaborazione e nella verifica mediante restituzione delle coordinate di almeno cinque punti determinati con operazioni di posizionamento GNSS a terra, per un numero di mappe in percentuale non superiore al 5% del totale delle mappe oggetto della presa (secondo il taglio standard) .

In tutti i casi verranno verificate le scale medie e minime (o, nel caso di camere digitali, la dimensione a terra dei *pixel*), la copertura stereoscopica completa del territorio oggetto del rilievo e la completa assenza di nubi e ombre da esse riportate.

II.3.3.1.3 Collaudo della digitalizzazione dei fotogrammi (eventuale)

Nel caso di utilizzo di immagini fotografiche sottoposte a digitalizzazione, per verificare la qualità della scansione sarà eseguito un confronto con il materiale fotografico tradizionale. A tal fine, per almeno il 5% dei fotogrammi la Ditta incaricata dovrà provvedere, su indicazione del Collaudatore, alla produzione delle tradizionali diapositive, su cui si eseguiranno tutte le verifiche comparative che si riterranno necessarie, in particolare verificando la congruenza fra coordinate di punti letti sulle diapositive e gli equivalenti individuati nell'immagine digitale.

A discrezione del Collaudatore, tali fotogrammi potranno coincidere, in tutto o in parte, con quelli da lui indicati per il collaudo del volo, di cui al punto precedente.

II.3.3.2 Collaudo dell'orientamento

Le operazioni di orientamento possono essere svolte secondo una certa varietà di mezzi e metodi a tutt'oggi ancora in evoluzione. Si prevede pertanto che la verifica delle operazioni di orientamento si svolgano in prima battuta in base alla una relazione dettagliata contenente i tabulati dei parametri di orientamento, delle coordinate dei punti e dei parametri statistici necessari a definire la qualità dei risultati.

Nel caso il Collaudatore riscontri errori, omissioni, imprecisioni, incoerenze nei dati forniti potrà ricorrere a valutazioni mirate mediante una metodologia di verifica definita in modo specifico.

II.3.3.3 Collaudo finale del modello altimetrico

Si rimanda alle procedure di verifica contenute in II.1.9.

II.4 PRESCRIZIONI PER L'UTILIZZO DI TECNICHE LIDAR

La derivazione di modelli altimetrici con tecniche LiDAR è ampiamente utilizzata da alcuni anni, principalmente per le precisioni richieste nei livelli 4 e 5 o superiori. Le seguenti prescrizioni sono pertanto destinate principalmente agli standard di precisione dei livelli 4 e superiori..

Il presente documento ha l'obiettivo di definire una prescrizione tecnica di dettaglio riguardante gli elementi e le procedure necessarie per rilevare ed elaborare dati LiDAR al fine di produrre modelli altimetrici.

II.4.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA E MODALITÀ OPERATIVE

Il termine LiDAR significa *Light Detection and Ranging* e costituisce l'equivalente ottico del radar o del sonar, ma con utilizzo di una fonte ottica, ossia un laser al posto delle microonde o delle onde sonore. Il laser emette un impulso ottico, del quale si misura accuratamente l'intervallo di tempo tra l'emissione e la ricezione dell'eco (o impulso di ritorno) e si converte il tempo in distanza percorsa conoscendo la velocità di propagazione del segnale. Il sistema è indicato anche come laser scanning, laser aviotrasportato, laser a scansione, altimetro laser. L'obiettivo *imaging*, se presente, si riferisce normalmente all'acquisizione simultanea di dati di intensità (dell'onda riflessa) e dati di altezza, possibile in alcuni sistemi.

Ai fini del presente documento, il LiDAR è definito come un sistema laser aviotrasportato, installato a bordo di aerei o elicotteri, utilizzato per acquisire coordinate x, y, z di punti del terreno e di sue caratteristiche, siano esse naturali o artificiali. I sistemi LiDAR aviotrasportati comprendono un ricevitore GNSS, una Unità di Misura Inerziale (IMU) e un telemetro laser a scansione; sono poi necessarie stazioni GNSS a terra per il posizionamento differenziale.

Il sistema misura la distanza fra il laser e la superficie del terreno entro una striscia al di sotto del velivolo, la cui ampiezza dipende dalle finalità della missione, dalle condizioni climatiche, dalle densità e spaziatura che si desidera ottenere per i punti rilevati nonché da altri fattori.

La procedura per ottenere le coordinate 3D di un punto del terreno con LiDAR può essere divisa in due fasi principali:

- ✓ acquisizione dei dati da aeromobile (pianificazione del volo, approntamento delle stazioni di riferimento a terra, taratura del sistema, acquisizione dati vera e propria, elaborazione dei dati di navigazione);
- ✓ elaborazione dei punti laser rilevati, con applicazione di successivi filtri e classificazione dei punti del terreno (riduzione dei dati ed eliminazione dei punti rilevati su elementi non appartenenti al terreno, trasformazione delle coordinate nel sistema di riferimento prescelto, tenendo conto dell'ondulazione del geoide, interpolazione sulla griglia del DEM).

II.4.2 CARATTERISTICHE GENERALI DELL'ACQUISIZIONE DATI

Un LiDAR o scanner laser costituisce un sistema integrato formato da un ricevitore GNSS, un distanziometro laser, un sistema di scansione e un sistema inerziale. Condizione per il

buon funzionamento del sistema è l'accurata taratura di ciascun componente ma anche del sistema nel suo complesso.

Il calcolo delle coordinate dei punti laser si effettua determinando vettori 3D. Le misure GNSS fissano la posizione dell'origine del vettore, il sistema inerziale ne individua la direzione (quella del raggio emesso) e la misura di distanza del telemetro laser ne determina il modulo. Di norma, il terreno viene scansionato in strisciate riprese da aeromobile, prevedendo la necessaria sovrapposizione lungo i bordi di strisciate adiacenti, corrispondente ad almeno il 20 %.

Gli impulsi laser vengono utilizzati come portanti nella misure della distanza, sulle quali possono essere sovrapposti (ad esempio per modulazione) altri segnali. È possibile focalizzare fortemente il raggio laser, il che consente di ottenere impronte al suolo assai piccole anche su distanze relativamente grandi. La divergenza del raggio laser produce al suolo un'impronta di diametro variabile da circa 25 cm ad 1 m, a seconda dello strumento e della quota relativa di volo. La superficie del terreno interagisce con gli impulsi e ne riflette una percentuale. Parte dell'energia riflessa ritorna al sensore e ciò consente di calcolare la distanza percorsa dall'impulso tenendo conto della velocità della luce. Su determinati materiali la luce può essere completamente assorbita. Le proprietà di riflessione della superficie del terreno dipendono dalla lunghezza d'onda del laser e variano considerevolmente con la natura della superficie, ad esempio se è molto brillante (neve) o molto scura (asfalto).

I sistemi LiDAR in commercio sono costruiti su due diversi principi di misura, legati al tipo di onda emessa:

- ✓ la maggior parte dei sistemi utilizza solo un impulso di durata molto breve. La distanza viene quindi stabilita misurando il tempo di volo dell'impulso. Dato che il raggio laser nel suo tragitto verso la superficie del terreno può toccare diversi ostacoli, particolarmente nelle zone boschive, ne possono risultare riflessioni multiple. Su alcuni sistemi il telemetro permette, con adeguate impostazioni operative, di registrare il primo, l'ultimo e echi intermedi di un singolo impulso inviato. Per la ricostruzione della superficie del terreno si utilizza generalmente l'ultimo eco (*last pulse*).
- ✓ altri sistemi impiegano invece, analogamente ai distanziometri topografici, una misura di sfasamento tra l'onda modulata emessa e quella rientrante. L'emissione di radiazioni è pertanto continua; per risolvere le ambiguità intere vengono impiegate più frequenze. Contemporaneamente, l'ampiezza del segnale rientrante costituisce una misura dell'intensità di luce riflessa e consente di trarre indicazioni sul tipo di materiale su cui sono stati rilevati i punti. Se il raggio laser colpisce oggetti di altezze diverse, si ottiene un valore di fase corrispondente alla distanza media dai punti colpiti.

II.4.2.1 Determinazione e selezione dei punti appartenenti al terreno

La determinazione dei punti laser consiste nella ripetizione, per ogni punto, della seguente sequenza

- ✓ determinazione della posizione dell'aeromobile con GNSS differenziale in modalità cinematica. Le posizioni dell'aereo vengono interpolate fra quelle misurate e consentono di definire il punto origine per la misura di distanza, tenendo conto dell'istante di emissione dell'impulso e dell'eccentricità dell'antenna rispetto al telemetro.

- ✓ per poter determinare la direzione del vettore si ottengono, grazie al sistema inerziale, gli angoli di rotazione tra il sistema di riferimento oggetto e un sistema solidale all'IMU, previa calibrazione del sistema.
- ✓ il modulo del vettore posizione spaziale è determinato con il telemetro laser.

I diversi sistemi si caratterizzano per la frequenza del laser e la procedura di misura della distanza.

Tra i dati primari (o dati grezzi) acquisiti dal LiDAR vi sono anche punti interamente riflessi dalla vegetazione o da edifici, che devono essere separati dai punti del terreno. A questo scopo le ditte utilizzano diverse procedure di classificazione o filtraggio, che possono portare a risultati anche considerevolmente diversi. Le procedure per la classificazione dei punti terreno variano notevolmente. Esse dipendono dalla tecnica di scansione utilizzata e dalla densità dei punti, fortemente variabile da sistema a sistema. La tecnica di rilievo con misura di sfasamento, che rileva anche l'intensità della riflessione (immagine laser del terreno) può inoltre impiegare questo dato per affinare la classificazione.

Le tecniche di classificazione si rivelano più o meno efficaci nella determinazione dei punti terreno, tuttavia in tutte le procedure si riscontrano classificazioni erranee e si rende necessaria una post-elaborazione, compreso anche l'*editing* manuale.

II.4.2.2 Prodotti del rilevamento

I prodotti ottenuti dal rilevamento LiDAR possono essere di stinti in:

- ✓ dati grezzi, cioè la nuvola di punti acquisita, formata da più ritorni;
- ✓ dati elaborati:

DSM - *First Pulse*: modello digitale della superficie ottenuto per interpolazione dal primo impulso laser; questo prodotto è ottenuto per interpolazione delle osservazioni originali rilevate dal LiDAR, dalle quali siano stati rimossi eventuali errori grossolani.

DSM - *Last Pulse*: modello digitale della superficie ottenuto per interpolazione dall'ultimo impulso laser; sempre previa rimozione di *outlier* e *blunder*.

- ✓ dati derivati:

DEM: modello digitale del terreno ottenuto previo filtraggio dell'ultimo impulso laser, eliminazione dei punti corrispondenti a tutti gli oggetti sovrapposti al terreno (es. edifici, coperture arboree, vegetazione, pali, cavi, ecc.), e interpolazione dei soli punti appartenenti al terreno.

breakline: linee che uniscono i punti del terreno caratterizzati da bruscelenche nelle specifiche del livello considerato (II.1.9). Nel caso in cui ciò non sia possibile tali informazioni devono essere integrate mediante restituzione fotogrammetrica o rilievo diretto sul terreno mediante tecniche che garantiscano le tolleranze planimetriche e altimetriche previste.

II.4.2.3 Caratteristiche della strumentazione

Tutti i sensori utilizzati devono possedere i necessari requisiti di precisione, devono essere calibrati e testati in modo tale da garantire il raggiungimento dell'accuratezza prevista per ciascun prodotto.

Lo scanner laser installato a bordo dell'aeromobile dovrà avere:

- ✓ potenza conforme alle norme di sicurezza ovvero tali da garantire la salvaguardia della salute umana;
- ✓ capacità di registrare più distanze per ogni singolo impulso laser al fine di discriminare le altezze del terreno in presenza di coperture arboree e vegetali;
- ✓ capacità di registrare il valore di intensità del segnale di ritorno da utilizzarsi quale ulteriore parametro per la classificazione dei punti.

Il rilievo sarà effettuato oltre che con la strumentazione di bordo (GNSS . IMU), con almeno 3 ricevitori GNSS, di classe geodetica posizionati a terra su punti noti o comunque determinabili nel sistema di riferimento definito al punto II.1.4 con precisione (σ) non inferiore a ± 5 cm, con frequenza di registrazione pari almeno a una misura al secondo (1 Hz).

Le stazioni GNSS di riferimento a terra dovranno trovarsi a meno di 50 km dall'aeromobile e garantire la ricezione del segnale da almeno cinque satelliti intercettati contemporaneamente dal sistema GNSS a bordo dell'aeromobile.

Le stazioni a terra potranno coincidere con:

- ✓ stazioni di reti permanenti regionali o nazionali;
- ✓ vertici della rete geodetica fondamentale (attualmente IGM95) o suoi raffittimenti regionali;
- ✓ vertici di raffittimento, ottenuti mediante posizionamento rispetto alle reti di stazioni permanenti o tramite collegamento almeno a tre vertici appartenenti alla rete geodetica fondamentale (IGM95) o a suoi raffittimenti regionali.

Gli aeromobili utilizzati devono essere adeguati ad operare alle quote di progetto, risultare idonei a garantire le specifiche richieste in termini di densità, distribuzione e accuratezza dei punti quotati acquisiti con il sensore LiDAR e devono essere regolarmente abilitati alla specifica attività.

II.4.2.4 Il progetto di volo

Preliminarmente all'esecuzione del rilievo dovrà essere pianificato, tramite opportuno software di simulazione, il periodo di esecuzione in modo da garantire una buona ricezione dei segnali satellitari tale da ottenere, per tutta la durata della missione, un valore del PDOP inferiore a 3.

In funzione dell'andamento e dell'assetto plano-altimetrico della superficie di ripresa dovranno essere progettati e realizzati dei blocchi di rilievo e il piano di volo con una ricopertura sufficiente a garantire la continuità del rilievo e a permettere il controllo della corretta georeferenziazione dei dati acquisiti.

Per "blocco" del rilievo si intende l'insieme di strisciate corrispondenti a un territorio omogeneo sotto il profilo altimetrico e ad altri eventuali criteri di suddivisione delle porzioni di territorio da rilevare per ciascun volo. In genere le strisciate appartenenti a un medesimo blocco di volo devono avere la medesima quota o distanza di presa e direzione di volo (salvo le strisciate trasversali al blocco), la medesima calibrazione sugli strumenti e il passaggio sulle medesime aree test (vedi di seguito).

Sempre ai fini della corretta georeferenziazione e della eliminazione di eventuali errori sistematici tra le strisciate, ogni blocco dovrà essere dotato in modo autonomo di strisciate trasversali alla direzione principale di volo, indicativamente in testa e in coda.

Il volo dovrà essere effettuato in condizioni favorevoli rispetto allo stato vegetativo delle latifoglie (assenza di foglie o con condizioni di minima densità fogliare), in condizioni di assente o minima copertura nevosa e in condizioni atmosferiche idonee per questa tecnologia di rilievo.

Il volo sarà progettato in modo tale da garantire una distribuzione omogenea e densa dei punti rilevati in modo tale che non ci siano celle di dimensioni pari a quelle previste per la griglia del DSM e DEM prive di punti misurati. Dovranno in particolare essere minimizzate le zone d'ombra in aree urbane o in presenza di manufatti ed eventualmente previste strisciate con abbracciamenti ridotti al fine di limitare angoli di *off-nadir*.

Dovrà essere redatto un progetto di volo, nel quale siano riportati i blocchi in cui sarà suddiviso il territorio da rilevare e le strisciate progettate, la quota assoluta e quella relativa pianificata per ogni strisciata, l'abbracciamento di ciascuna strisciata e la distanza trasversale e lungo la linea di volo tra i singoli punti rilevati.

I grafici dei progetti di volo dovranno essere realizzati sulla cartografia IGM alla scala 1:25.000, dovranno essere disponibili sia in forma cartacea che in forma digitale nel formato concordato con l'ente appaltante e dovranno essere corredati da una relazione sintetica e da simulazioni analitiche del progetto; tali documenti devono indicare la densità media dei punti rilevati, l'accuratezza prevista, la distanza massima tra i punti, l'interasse tra le strisciate, la sovrapposizione trasversale garantita, l'andamento dei valori di GDOP (sempre inferiori a 5) per il periodo previsto per il volo.

Contestualmente saranno consegnate le coordinate dei punti eseguiti a terra (aree-test e GCP) e la relativa documentazione (monografie complete di fotografie).

L'operatore del rilievo dovrà concordare con l'ENAV e con il COFA i piani di volo per ottenere tutte le necessarie autorizzazioni al sorvolo. Per le zone operative militari e le aree soggette a particolari norme restrittive della navigazione aerea, si dovrà ottenere il tempestivo rilascio delle particolari autorizzazioni.

II.4.2.5 La calibrazione della strumentazione

La strumentazione deve essere calibrata durante l'esecuzione di ciascun blocco di rilievo mediante l'utilizzo di aree-test.

Tali aree dovranno essere pianeggianti, contenere sia spazi aperti (ad es. piazzali, parcheggi, campi da calcio, etc.) sia fabbricati grandi e regolari (ad esempio edifici industriali). In ogni caso saranno scelte in modo tale che su di esse sia garantita un'alta precisione della misura delle quote. Nelle aree-test verranno effettuate, preventivamente alla calibrazione, rilievi a terra di punti di controllo sul terreno (GCP) con strumentazione che garantisca una precisione significativamente superiore a quella del rilievo LiDAR (ad esempio misure GNSS con ricevitori di classe geodetica). In fase di acquisizione del dato, tali aree-test verranno utilizzate per verificare la stabilità della calibrazione dei sensori e l'eliminazione o la riduzione di eventuali errori sistematici.

Le analisi statistiche relative ai confronti tra dati LiDAR e dati acquisiti a terra dovranno essere rese disponibili e dovranno essere segnalate eventuali correzioni di errori sistematici.

II.4.2.6 Materiale da consegnare dopo il volo

Eseguito il volo dovranno essere consegnati, per la valutazione della qualità del rilievo, una relazione tecnica con la descrizione e la documentazione completa delle operazioni svolte,

tutti i dati accessori utilizzati per il raggiungimento del risultato finale atteso e i prodotti finali di consegna.

Nella relazione dovranno essere inoltre riportate tutte le eventuali criticità riscontrate nella fase del volo e nelle successive elaborazioni. I grafici e le carte allegati saranno consegnati anche in un formato GIS da concordare con l'ente.

In particolare essa dovrà contenere:

- ✓ Autocertificazione scritta sui seguenti punti:
 - che non si sono verificati problemi tecnici durante i voli per l'acquisizione dei dati;
 - che i dati non sono affetti da *bias*; durante il rilievo non si sono verificate variazioni anomale dei parametri di assetto dell'aeromobile
 - che le aree rilevate non presentano alcuna discontinuità.
- ✓ i grafici con l'interasse e l'ingombro delle strisciate e i dati dei voli;
- ✓ il rapporto di volo;
- ✓ le monografie dei punti e le coordinate dei rilievi effettuati a terra (incluse le aree-test e altre eventualmente ritenute necessarie), la documentazione relativa alla determinazione delle stazioni GNSS di riferimento e le loro monografie;
- ✓ i risultati dei confronti 3D tra i punti rilevati con il LiDAR e le aree-test e opportune analisi statistiche sugli stessi (disponibili anche in formato di foglio di calcolo elettronico);
- ✓ i file in formato RINEX relativi alle misure GNSS acquisite dai ricevitori di riferimento e la documentazione del processo di elaborazione;
- ✓ tutti i dati e le elaborazioni, anche ai fini del controllo di qualità, compreso il corretto funzionamento dei sistemi di posizionamento satellitare sia a bordo dell'aeromobile sia delle stazioni a terra e i valori di PDOP; in particolare saranno consegnati:
 - il grafico con l'andamento del PDOP;
 - la tabella (in formato di foglio di calcolo elettronico) e il grafico del confronto tra le diverse (e almeno tre) soluzioni per la traiettoria, per ogni coordinata;
 - il grafico relativo alla modalità di determinazione delle ambiguità, ovvero se sono state fissate intere o reali;
 - il grafico delle coperture satellitari sulle stazioni GNSS di riferimento e sul ricevitore dell'aeromobile.
- ✓ il grafico e il tabulato in formato di foglio di calcolo elettronico con il ricoprimento trasversale tra le varie strisciate;
- ✓ carta delle differenze massime (in valore assoluto) tra le quote dei punti relative a due strisciate nelle zone di ricoprimento. Tale carta potrà essere ricavata o mediante rasterizzazione dei dati con passo di risoluzione pari alla densità media delle osservazioni o mediante interpolazione dal seminato di punti della prima strisciata sulla seconda e viceversa oppure generando entrambi i TIN delle strisciate e proiettando ciascuna nuvola di punti sul TIN dell'altra strisciata; in ogni caso le modalità di elaborazione della carta saranno preventivamente concordate con il Committente;

- ✓ tabella contenente le statistiche del confronto tra tutte le strisciate nelle aree di ricoprimento; in particolare dovranno essere riportati: identificativi delle strisciate, minimo, massimo, media, mediana e deviazione standard delle differenze;
- ✓ la carta raster del numero di misure per ogni cella della griglia corrispondente al prodotto finale.

In questa fase sarà anche consegnata la nuvola di punti grezzi LiDAR senza trattamenti di filtraggio o adattamento di alcun tipo forniti per singola strisciata, conservando la ridondanza delle misure, ripetute ad ogni passaggio, sulle aree-test. I dati grezzi saranno forniti in file (corrispondenti alle diverse strisciate) in formato ASCII; per ogni impulso sarà fornito: il tempo di emissione e per ogni eco saranno fornite le coordinate, approssimate alla seconda cifra decimale, e il valore dell'intensità.

A seguito dell'analisi del materiale consegnato, il Committente potrà richiedere all'operatore del rilievo di fornire, per alcune zone campione da concordare (e comunque globalmente non superiori al 5 % delle zone di ricoprimento) i file sintetici contenenti, almeno per il primo e ultimo eco, le coordinate planimetriche, le quote ellissoidiche, le intensità e l'indicativo della strisciata di appartenenza.

II.4.3 ELABORAZIONE DEI DATI PRIMARI

In questa fase vengono combinati i dati della traiettoria, dedotti dalle misure GNSS e INS con le osservazioni del laser, sincronizzandoli tra di loro per ottenere la nuvola di punti. Ad ogni punto rilevato deve essere associata anche la misura del valore di intensità della risposta, che dipende dal tipo di terreno che è stato colpito dal raggio laser.

II.4.3.1 Definizione delle quote ortometriche

La georeferenziazione dell'aeromobile e, conseguentemente, dei punti rilevati deve essere riferita al sistema di riferimento definito al punto II.1.4.

Inoltre, le quote ellissoidiche devono essere trasformate in quote ortometriche in base al modello di geoide (ITALGEO) più recente (attualmente ITALGEO2005), messo a disposizione dall'Istituto Geografico Militare.

Qualora i dati siano richiesti anche in altri sistemi geodetici cartografici utilizzati in ambito nazionale (ROMA1940, ED1950), le trasformazioni dovranno essere eseguite con la metodologia e gli strumenti messi a disposizione dall'Istituto Geografico Militare (procedura Verto, nella versione più recente).

II.4.3.2 Filtraggio e classificazione

Tra i prodotti oggetto di consegna, l'operatore del rilievo deve fornire il modello digitale del terreno, ottenuto per interpolazione dalle sole quote del terreno nudo; deve pertanto eliminare dai dati LiDAR i punti rilevati su ponti, edifici e altre strutture e quelli sulla vegetazione.

Tale operazione prende il nome di filtraggio e classificazione e consiste nella assegnazione dei punti della nuvola LiDAR ad almeno 3 categorie. Innanzitutto si dovranno separare le classi terreno e non terreno e, in seguito, i punti non terreno dovranno essere classificati in vegetazione e artefatti.

In questa fase dovranno essere individuati e indicati con una categoria apposita i punti che risultino, in base a test statistici, errori grossolani. Un possibile approccio a questo riguardo è l'utilizzazione di un'interpolazione polinomiale localizzata (funzioni spline) con passo ampio (indicativamente 30-50 m) e l'analisi delle differenze tra valori interpolati e valori rilevati. Una differenza significativa (tale valore dipendente fortemente dalla morfologia del terreno) può essere indicatrice di un possibile dato anomalo.

Dovranno essere consegnati in questa fase

- ✓ relazione sulle procedure e *software* utilizzati per la rimozione degli errori grossolani e per il filtraggio, contenente anche l'indicazione di eventuali criticità riscontrate;
- ✓ test e verifiche eseguite dall'operatore del rilievo per verificare la bontà del risultato ottenuto;
- ✓ i file contenenti le coordinate planimetriche, le altezze ortometriche, il valore dell'intensità e il codice di classificazione.

II.4.3.3 Dati elaborati e prodotti finali di consegna

Dovranno essere consegnati in questa fase:

- ✓ relazione sulle procedure e *software* utilizzati per il calcolo dei prodotti finali di consegna, contenente anche l'indicazione di eventuali criticità riscontrate;
- ✓ il DSM . primo ritorno: è il grigliato regolare ottenuto dai dati grezzi del rilievo, opportunamente filtrati, selezionati (rimozione degli errori grossolani) e interpolati per rappresentare l'andamento della superficie (primo ritorno);
- ✓ DSM . ultimo ritorno: è il grigliato regolare ottenuto dai dati grezzi del rilievo, opportunamente filtrati, selezionati (rimozione degli errori grossolani) e interpolati per rappresentare l'andamento della superficie (ultimo impulso);
- ✓ DEM: è il grigliato regolare ottenuto per interpolazione dalle quote corrispondenti all'ultimo ritorno dei soli punti terreno (con esclusione quindi dei punti corrispondenti a errori grossolani, artefatti e vegetazione).

II.4.4 IL CONTROLLO DI QUALITÀ

In corso d'opera saranno eseguite visite presso i locali dell'operatore del rilievo per la verifica e il rifacimento di alcune fasi di pretrattamento e filtraggio dei dati LiDAR.

Saranno controllati e riverificati tutti i materiali consegnati (II.4.2.6 e II.4.3.3) per la valutazione dell'adeguatezza rispetto alla qualità del risultato finale atteso.

II.4.4.1 Le verifiche di qualità interna

Le verifiche di qualità interna devono essere svolte per quanto riguarda le due fasi principali del processo di produzione del modello altimetrico: la fase di acquisizione dei dati mediante volo LiDAR e la fase di filtraggio e classificazione.

II.4.4.1.1 La verifica del volo

Al termine del volo LiDAR, i dati grezzi devono essere consegnati secondo le specifiche definite in . È necessario verificare:

- la calibrazione pre-volo effettuata sulle aree test deve essere correttamente svolta al fine di permettere la determinazione di eventuali sistematismi presenti;
- le acquisizioni della strumentazione GNSS-IMU devono permettere un corretto posizionamento cinematico del velivolo entro le accuratezze stabilite. In particolare occorre analizzare:
 - la bontà delle configurazioni satellitari del ricevitore GNSS posto sul velivolo e dei 3 ricevitori a terra: coperture satellitari con almeno 5 satelliti e andamento del GDOP con valori sempre minori di 8;
 - la correttezza del posizionamento: le posizioni devono essere determinate sempre ad ambiguità fissata ad un intero per la gran parte del percorso (almeno il 95%) e occorre confrontare le 3 traiettorie indipendentemente determinate con le 3 stazioni GNSS fisse a terra e quella derivante dalla elaborazione congiunta GNSS-IMU. Le differenze tra queste 4 traiettorie permette di valutare la congruenza tra le acquisizioni effettuate (che deve essere sufficiente per soddisfare le accuratezze previste) e di scegliere infine la soluzione ottimale;
- la congruenza tra strisciate adiacenti nelle zone di ricoprimento: è necessario che le strisciate adiacenti si sovrappongano di almeno il 20% della loro larghezza media. In queste aree di sovrapposizione, per mezzo della carta delle differenze, si valutano le discrepanze presenti in campo aperto: queste differenze devono essere sempre minori di $(1.4142 * P_{Q(a)})$, con $P_{Q(a)}$ (II.1.9) corrispondente alla precisione altimetrica in campo aperto del livello a cui corrisponde il modello altimetrico da verificare;
- la densità di acquisizione (numero di punti posizionati per ogni cella della griglia corrispondente al prodotto finale) e la completezza mediante la carta corrispondente.

II.4.4.1.2 La verifica della elaborazione dei dati

In questa fase si devono eseguire i seguenti controlli:

- La correttezza dell'applicazione del più recente modello di geoide messo a disposizione dall'IGM per la determinazione delle quote ortometriche;
- L'efficacia della classificazione della nuvola di punti;
- Verifica della presenza di errori grossolani mediante operazioni definite in II.1.10.1.2.

II.4.4.2 Controllo finale

Si rimanda alle procedure di verifica contenute in II.1.9.

II.5 PRESCRIZIONI PER L'UTILIZZO DI TECNICHE SATELLITARI

Nel corso degli ultimi anni sono stati rilasciati e continuamente aggiornati DSM derivati da sensori satellitari: in particolare il DSM SRTM, costantemente disponibile su una larga parte della Terra e i DSM ASTER, che sono disponibili su richiesta. Si tratta in questi casi di DSM di livello 0 o 1 (II.1.9).

Inoltre, la continuamente crescente disponibilità di sensori satellitari ad alta (da 2.5 m a 1 m) e altissima risoluzione (da 1 m a 0.5 m) in grado di acquisire stereocoppie (Worldview, Quickbird, Ikonos, Cartosat-1, SPOT5, Alos-Prism, Kompsat, EROS A e EROS B) mette a disposizione una ulteriore possibilità di generazione di DSM. Si tratta in questi casi di DSM di livello 1 o 2.

Questa tecnologia può validamente sostituire le riprese aeree per la produzione di DSM/DEM, rivelandosi particolarmente adatta su aree locali ove la pianificazione e realizzazione di un volo aerofotogrammetrico può risultare eccessivamente onerosa.

Il presente paragrafo ha l'obiettivo di illustrare le caratteristiche dei DSM SRTM e ASTER e di definire una prescrizione tecnica riguardante gli elementi e le procedure necessari per generare DSM da stereocoppie satellitari ad alta e altissima risoluzione.

II.5.1 PRESCRIZIONI PER L'USO DEL DSM SRTM

II.5.1.1 Caratteristiche generali del DSM SRTM

La *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) è una *partnership* tra la NASA e la *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA); tale missione, organizzata a bordo del *NASA Space Shuttle Endeavour* (11-22 February 2000), ha conseguito l'importantissimo risultato di realizzare un DSM su quasi tutta la superficie emersa della Terra.

In particolare, la SRTM si è basata su un *dual Spaceborne Imaging Radar* (SIR-C) e su un *dual X-band Synthetic Aperture Radar* (X-SAR) configurati in modalità interferometrica, che hanno permesso di acquisire dati su circa l'80% della superficie emersa della Terra tra circa 60° di latitudine Nord e circa 56° di latitudine Sud (Figura 1).

I dati SRTM sono stati ottenuti al *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) in Pasadena, CA elaborando le riflessioni radar in modo da generare il DSM. Successivamente tali dati sono stati editati dalla (NGA), ex *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA).

Sono disponibili tre versioni diverse del DSM SRTM:

- ~~Finished~~+- <http://eros.usgs.gov/products/elevation/srtmbil.html>
- DTED® - <http://eros.usgs.gov/products/elevation/srtmdted.html>
- CGIAR-CSI SRTM - <http://srtm.csi.cgiar.org>

In tutte le versioni il DSM SRTM è organizzato secondo una griglia regolare in coordinate geografiche, secondo il datum *World Geodetic System 1984* (WGS84), mentre le quote ortometriche sono state determinate dalle corrispondenti ellissoidiche tramite il *Earth Gravitational Model* (EGM 96) *geoid*.

E' bene specificare che tale prodotto è un DSM e non un DEM, in quanto le quote sono relative alla superficie riflettente il segnale radar, che può essere vegetazione o manufatti che insistono sul terreno.

II.5.1.2 SRTM *finished*

Il trattamento di *editing* definito *finishing*, si è concretizzato nell'individuazione e riduzione a superfici piane dei corpi idrici, a una migliore definizione delle linee di costa, alla rimozione di *outlier* e al riempimento di piccole lacune.

Il prodotto *"finished"* è disponibile in due formati:

- griglia con passo di 1 arc-secondo per gli Stati Uniti (continente e isole)
- griglia con passo di 3 arc-secondo per le altre zone comprese tra circa 60° di latitudine Nord e circa 56° di latitudine Sud

I dati SRTM *"finished"* possiedono rispettivamente un'accuratezza orizzontale di 20 m (CE90) e una sulla quota di 16 m (LE90).

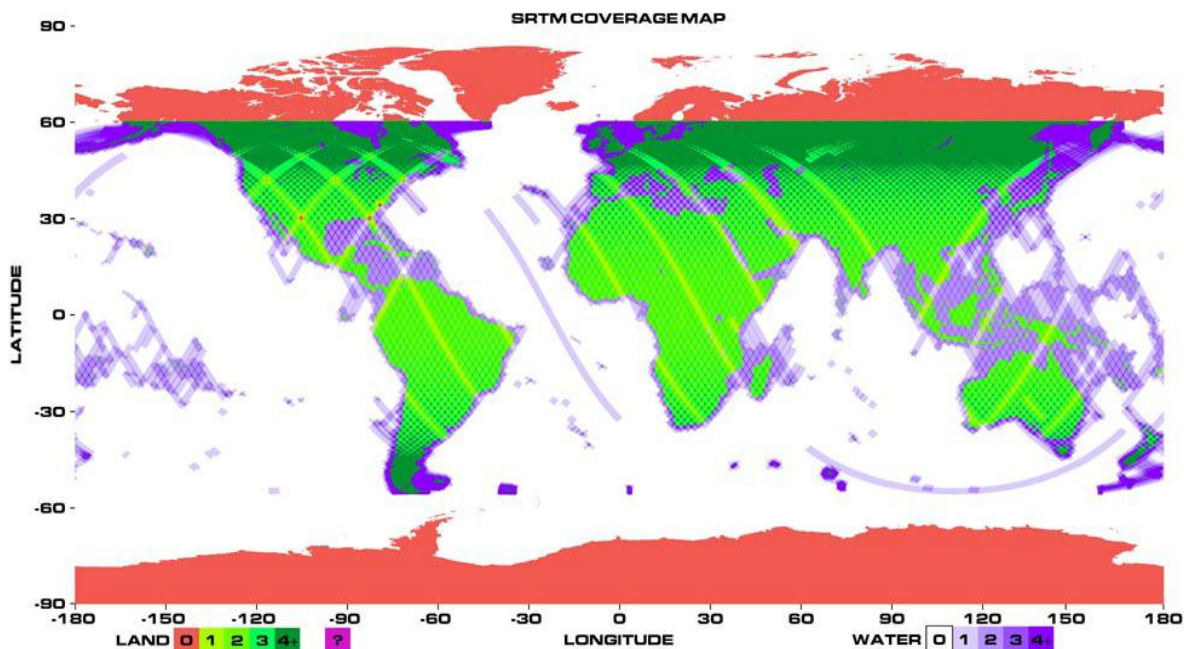


Figura 1 . Copertura del DSM SRTM

(I colori indicano il numero di passaggi sullo stesso punto da parte del sensore SIR-C sia su terra che su mare; le zone in rosso non sono state rilevate. Le strisciate indicano i passaggi del sensore X-SAR, che offrendo uno swath più limitato non è in grado di coprire tutta la zona rilevata dal sensore SIR-C)

I dati SRTM *finished* sono pubblicamente disponibili (<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3/>).

II.5.1.3 SRTM DTED®

Le quote SRTM DTED® *Level 2* sono fornite su due diverse griglie, in dipendenza della latitudine:

- griglia con passo di 1+tra 0° e 50° di latitudine
- griglia con passo di 1+in latitudine e 2+in longitudine tra 50° e 60° di latitudine

Le quote SRTM DTED® *Level 1* sono derivate da quelle SRTM DTED® 2 in modo tale che esse siano uguali a quelle DTED® 2 nelle stesse posizioni e sono fornite su due diverse griglie, in dipendenza della latitudine:

- griglia con passo di 3+tra 0° e 50° di latitudine
- griglia con passo di 3+in latitudine e 6+in longitudine tra 50° e 60° di latitudine

I dati SRTM DTED® sono stati editati in modo da rimuovere *outlier* maggiori di 100 m rispetto ai valori circostanti e riempire piccole lacune (fino a 16 valori mancanti) per interpolazione sui valori circostanti. Tuttavia rimangono nei dati lacune di estensione maggiore (dovute a *shadowing*, *layover* e scarsa riflettività) e %sole+di dati non correttamente georeferenziati in quota a causa di errori sistematici residui.

Per quanto riguarda i corpi idrici per i dati SRTM DTED® sono state adottate le seguenti convenzioni:

- la quota dei mari è fissata a 0 m
- i laghi aventi una qualunque dimensione (diametro) maggiore di 600 m sono ridotti a una superficie a quota costante
- i fiumi più larghi di 183 m hanno una pendenza costante
- le isole sono individuate se hanno un diametro maggiore di 300 m o una quota massima superiore a 15 m

Complessivamente, i dati sono disponibili sul 95% dell'area rilevata e l'accuratezza sulla quota è significativamente migliore di 16 m (LE90).

Sia i dati SRTM DTED® *Level 1* a livello globale che i dati SRTM DTED® *Level 2* (disponibile per gli Stati Uniti, continente e isole) sono distribuiti dal *National Center for Earth Resources Observation & Science* (EROS) su DVD; ogni DVD ha un costo di 60\$. In particolare:

- l'area coperta dal SRTM DTED® *Level 1* è suddivisa in 13 parti, ognuna delle quali contenuta in un DVD
- gli Stati Uniti (continente e isole) sono suddivisi in 7 parti, ognuna delle quali contenuta in un DVD

II.5.1.4 CGIAR-CSI SRTM

Poiché i dati SRTM DTED® contengono ancora lacune di estensione rilevante, il *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI) del *Consultative Group for International Agricultural Research* (CGIAR) ha eseguito un'ulteriore operazione di editing realizzando il CGIAR-CSI SRTM.

I dati CGIAR-CSI SRTM rappresentano una copertura completa ottenuta elaborando i dati originali SRTM in diversi passi; essi sono forniti su una griglia con passo di 3+su tutta la zona coperta.

I dati SRTM originali includono *no-data areas* (i corpi idrici e zone con scarsa riflettività), complessivamente pari a 3,436,585 *voids* che coprono 796,217 km²; in casi estremi, come il Nepal, le aree senza dati rappresentano il 9.6% della superficie della nazione (32,688 *voids* per complessivi 13,740 km²). Le *no-data areas* dovute a insufficienti dettagli di *texture* sono prevalentemente collocate in zone di montagna (Himalayas and Andes) o desertiche (Sahara).

La metodologia di completamento produce una superficie liscia sulle *no-data areas*; pertanto vengono rappresentate solo i lineamenti morfologici principali e non le variazioni di alta frequenza. Sono state eseguite dettagliate analisi relativamente alla qualità delle quote CGIAR-CSI SRTM su una regione in Colombia contenente *no-data areas* sul 43% della sua estensione, evidenziando un'accuratezza media di 5 m rispetto a un DEM ottenuto da cartografia (Jarvis et al., 2004).

I dati CGIAR-CSI SRTM devono essere citati come segue: Jarvis, A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2006, *Hole-filled SRTM for the globe Version 3*, e sono disponibili pubblicamente sul CGIAR-CSI SRTM 90m Database: <http://srtm.csi.cgiar.org>.

II.5.1.5 Qualità del DSM SRTM

Al fine di fornire ulteriori elementi relativi alla qualità dei DSM SRTM (SIR-C) si riporta una tabella dovuta a lavori del Prof. Karsten Jacobsen (*personal communication*) della Leibniz University di Hannover (Tabella 11).

	RMSZ [m]	bias [m]	RMSZ F(terrain inclination) [m]
Arizona, open area (flat – smooth mountains)	3.9	1.3	$2.9 + 22.5 * \tan \alpha$
Williamsburg NJ, open area (flat)	4.7	-3.2	$4.7 + 2.4 * \tan \alpha$
Atlantic City NJ, open area (flat)	4.7	-3.6	$4.9 + 7.6 * \tan \alpha$
Bavaria, open area (rolling)	4.6	-1.1	$2.7 + 8.8 * \tan \alpha$
Bavaria, open area (steep mountain)	8.0	-2.4	$4.4 + 33.4 * \tan \alpha$
Zonguldak, open area (rough mountain)	7.0	-4.4	$5.9 + 5.6 * \tan \alpha$
West-Virginia, forest (mountainous)	11.6	-7.7	$7.3 + 7.2 * \tan \alpha$
Atlantic County, open area (flat)	4.4	-3.4	4.4
Pennsylvania, open area (flat – rolling)	5.4	-0.2	$5.3 + 9.4 * \tan \alpha$
Pennsylvania, forest (mountainous)	7.9	-4.3	$7.0 + 6.4 * \tan \alpha$
Philadelphia, city area, filtered (flat)	3.2	-1.3	3.2
root mean square Z-discrepancies of SRTM C-band height models [m]			$\alpha = \text{terrain inclination}$

Tabella 11 - Risultati sperimentali relativi alla valutazione dell'accuratezza di DSM SRTM

E' importante notare che è generalmente evidente una dipendenza dell'accuratezza dalla pendenza del terreno.

Complessivamente risulta che le già citate specifiche di qualità della missione SRTM sono soddisfatte in tutti i casi (in molti anche ampiamente) tranne quello relativo alla West-Virginia.

Rispetto alla classificazione adottata, i DSM SRTM si collocano tra il Livello 0 e il Livello 1.

II.5.2 PRESCRIZIONI PER L'USO DI DSM ASTER

II.5.2.1 Caratteristiche generali del DSM ASTER

L'Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) è uno dei vari sensori a bordo della piattaforma Terra lanciata nel dicembre 1999.

E' subito importante sottolineare che:

- ASTER non acquisisce dati con continuità ma solo su richiesta
- tra i prodotti ASTER è compreso ASTER DEM (Shortname: AST14DEM) (<http://lpdaac.usgs.gov/aster/ast14dem.asp>); tale prodotto è un DSM e non un DEM, anche se ufficialmente viene chiamato ASTER DEM

Lo ASTER DEM è un prodotto classificato come *Level-3* ottenuto da dati *Level 1A* rilevati dal sensore *Visible Near Infrared* (VNIR), utilizzando le bande 3N (*nadir-viewing*) e 3B (*backward-viewing*) con risoluzione di 15 m e con uno *swath* ampio 60 km. La stereocoppia in banda 3 viene acquisita nell'intervallo spettrale 0.78-0.86 μ con un rapporto B/H (base di presa/altezza media di volo del satellite) di 0.6 e un angolo di intersezione delle rette omologhe di 27.7°. L'immagine *backward* viene acquisita circa 1 minuto dopo l'immagine nadirale.

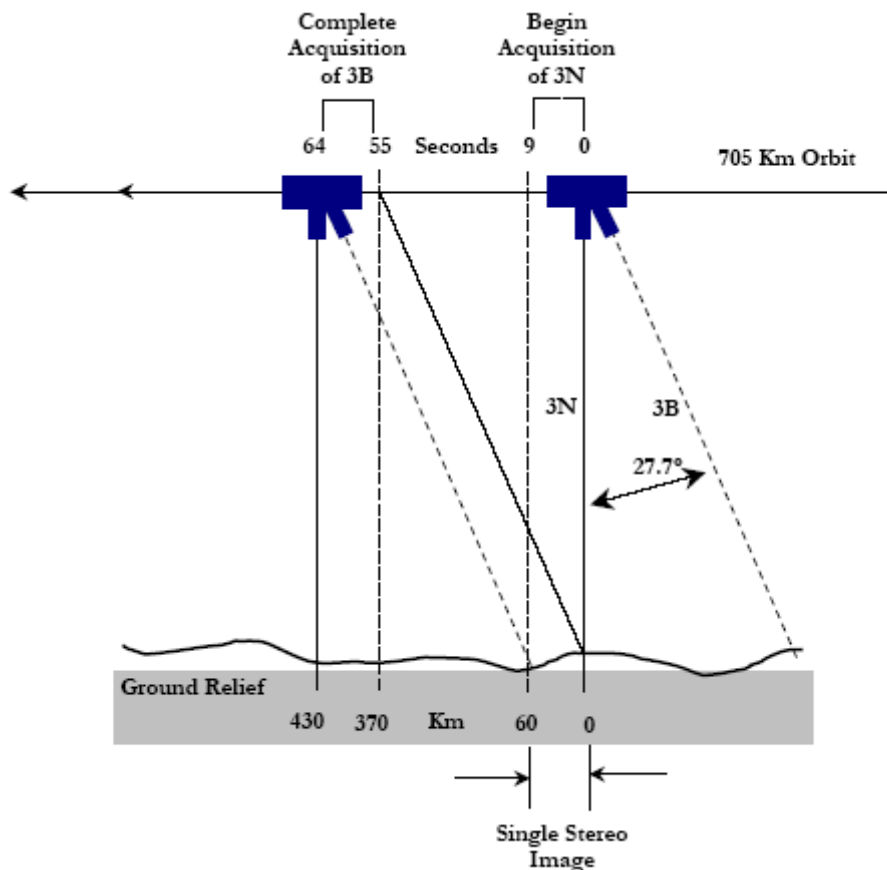


Figura 9 - Geometria dell'acquisizione di una stereocoppia ASTER

A partire dall'estate 2006, presso il *Land Process . Distributed Active Archive center* (LP DAAC) è stato implementato un nuovo *software* per la produzione di DSM (basato sulla correlazione delle immagini stereo) in grado di generare automaticamente un DSM relativo

senza impiego di *Ground Control Points* (GCPs). Conseguentemente non viene più eseguito nessun editing manuale: i maggiori corpi idrici vengono individuati automaticamente e ai punti ad essi relativi viene assegnato un valore di quota costante; le aree prive di dati, sebbene infrequenti, non vengono completate; le nuvole appaiono come aree chiare.

ASTER DEM è organizzato secondo una griglia regolare di 30x30 m² in coordinate cartografiche UTM-WGS84, mentre le quote ortometriche sono state determinate dalle corrispondenti ellissoidiche tramite il *Earth Gravitational Model* (EGM 96) *geoid*.

ASTER DEM viene realizzato su ordinazione previa selezione dei dati ASTER Level-1A per mezzo dello [EOS Data Gateway](#). È importante notare che il preesistente archivio di ASTER DEM non è più operativo: ogni ASTER DEM è generato a richiesta e non viene conservato. Ovviamente è opportuno selezionare immagini prive di nuvole per generare il DSM; la procedura per ordinare ASTER DEM è descritta in <http://lpdaac.usgs.gov/tutorial/>

Ogni *file* copre un'estensione di circa 60x60 km e viene rilasciato in formato GeoTIFF (dimensione approssimativa 25 Mb).

II.5.2.2 Qualità dello ASTER DEM

L'accuratezza del nuovo LP DAAC ASTER DEM relativo soddisfa sostanzialmente le specifiche del documento di riferimento per gli ASTER DEM assoluti (*Algorithm Theoretical Basis Document* (ATBD)) (Lang & Welch, 1999), ed è approssimativamente uguale a 25 m RMSE_{xyz}.

Al fine di fornire ulteriori elementi relativi alla qualità degli ASTER DEM si riporta una tabella estratta da (Gamache, 2004) (Tabella 2).

Rispetto alla classificazione adottata, gli ASTED DEM si collocano al Livello 0.

Site	# of GCP	GCP Source	CP Source	# CP	Point accuracy (m)	maximum errors	x	y	z	ASTER DEM Resolution (m)	Total Relief (m)	Size of test area (km ²)	Source
Mt. Fuji Japan	5	1:25,000	1:25,000	51	±5		6	6	±28.3	75	2,100	504	A Hirano et al.
Andes Chile/Polivia	5	1:50,000	1:50,000	53	±10 ±5		19.5	19.5	±15.8	150	2,200	3,163.5	A Hirano et al.
San Bernardino, USA	12	DGPS	1:24,000	16			18	18	±10.1	75	1,500	506.25	A Hirano et al.
Huntsville, USA	8	DGPS	DGPS 30 m USGS DEM	39 512 239,776	? ? ±1.5		9	9	±7.3 ±11.1 ±14.7	30	300	405	A Hirano et al.
Zonguldak, Turkey	18	1:50,000	1:25,000 GPS	?	?		?	?	±12 ±16	?	?	?	Buyuksalih & Jacobsen, 2004 Kocak et al. 2003
Okanagan Lake Canada	35	1:50,000	25 m DEM		±25-30 xy 10 z	167* 28 (LE9)* 51 (LE9)*				30	1,786	?	Toutin, 2002
Gruhen Switzerland	?	?	25 m DEM		?	~500 m			±60	30	2,200		Kaas A, 2002 Kaas et al., 2002
Cordillera Blanca, Peru	?	SPOT Image	DEM from 1:100,000 topo		±10	58 m							Vignon et al., 2002
Tien Shan Kyrgyzstan/ Kazakhstan	33	GPS 1:100,000	SRTM DEM			-100 m SE Aspects, slopes >35°				30	1,300		Boch et al. (forthcoming)
Drum Mountains, USA	8	GPS	GPS 30 m USGS DEM			±13.8 +155 m -108 m Mean 1.9 m 17 m (LE9) 10 m (LE9)	15.8	10.5	7.9				Toutin & Cheng (2001)

Tabella 12 - Risultati sperimentali relativi alla valutazione dell'accuratezza di DSM ASTER

II.5.3 PRESCRIZIONE PER L'UTILIZZO DI IMMAGINI SATELLITARI AD ALTA E ALTISSIMA RISOLUZIONE

II.5.3.1 Acquisizione del dato

Le procedure descritte di seguito si applicano a immagini almeno radiometricamente corrette, o comunque a li velli di pre-processamento che non includano l'ortorettifica.

Nella fase di acquisizione devono esser e considerate le seguenti caratteristiche:

- assenza di copertura nuvolosa
- rapporto base di presa (B)/altezza media di volo del satellite (H) (dipende dagli angoli *off-nadir* delle due immagini che costituiscono la stereocoppia)
- epoche delle immagini costituenti la stereocoppia (contemporanee o relative a epoche diverse)
- metadati allegati

Il primo aspetto è ovvio e non sarà ulteriormente commentato.

Per il secondo aspetto si ricorda che, da un lato, la precisione della quota migliora all'aumentare del rapporto B/H, dall'altro un rapporto B/H elevato può causare notevoli problemi nel *matching* tra le due immagini per occlusioni e ombre molto diverse, soprattutto in ambito urbano. E' quindi necessaria una conveniente mediazione, con B/H indicativamente non superiori a 0.5-0.6. Si segnalano alcuni risultati particolarmente interessanti anche con piccoli (0.2) valori di B/H.

Il terzo aspetto è molto importante per la qualità del *matching*, dal quale dipende la qualità del DSM sia in termini di accuratezza che, soprattutto, di completezza: immagini contemporanee, che devono necessariamente essere acquisite in modalità stereo *along track* sono notevolmente più costose ma garantiscono risultati generalmente migliori e sono più semplici da usare anche con *software* commerciali; immagini singolarmente acquisite in passaggi orbitali diversi sono, viceversa, notevolmente più economiche ma richiedono generalmente un pretrattamento per migliorare il *matching* o l'impiego di *software* scientifico che implementa strategie di *matching* più raffinate.

Infine i metadati relativi alle caratteristiche del sensore e alla presa dell'immagine saranno utilizzati sia durante le procedure di ortorettifica qui descritte sia come base per definire i nuovi metadati da allegare al prodotto finale. Per la strutturazione delle informazioni inerenti ai metadati finali si rinvia a quanto prescritto al punto II.1.6.1.

II.5.3.2 Descrizione del processo di generazione del DSM

Il processo di generazione del DSM si articola in due passi fondamentali:

- orientamento congiunto delle due immagini
- *matching* tra le due immagini e generazione della nuvola di punti che costituisce il DSM

L'orientamento è compiuto attraverso l'utilizzo di modelli funzionali tra lo spazio immagine e lo spazio oggetto (terreno), che possono esser e solo di due tipi (Toutin):

- funzioni polinomiali razionali (*Rational Polynomial Functions* . RPF) con l'ausilio dei coefficienti (*Rational Polynomial Coefficients* . RPC) forniti tra i metadati dell'immagine
- modello rigoroso (o fisicamente basato)

Il *matching* può essere realizzato tramite metodologie diverse:

- crosscorrelazione (è il metodo più semplice, implementato in tutti i *software* commerciali; richiede immagini sostanzialmente simili dal punto di vista radiometrico) (Kraus)
- *feature based - least squares* (è il metodo più raffinato, implementato solo in *software* scientifico) (Baltsavias)

E' inoltre necessario stabilire il passo di generazione del DSM, che è funzione della risoluzione delle immagini (GSD); in generale si pone il passo uguale a 2-3 GSD.

Infine, se si vuole ottenere un DEM, si deve procedere al filtraggio del DSM ottenuto. Anche questa operazione può essere condotta con *software* commerciale o scientifico.

II.5.3.3 **Dati ausiliari necessari**

Il processo di generazione del DSM necessita dell'utilizzo di punti a terra (*Ground Points* . GP) di coordinate note (definiti rispettivamente *Ground Control Points* o *Check Points* a seconda che siano usati per il calcolo del modello o per la sua validazione) per l'orientamento delle immagini e la valutazione della sua accuratezza, che condiziona direttamente l'accuratezza geometrica del DSM.

Possono inoltre essere inseriti dei punti di legame (*Tie Points*, TP) per migliorare la precisione dell'orientamento, analogamente a quanto comunemente operato per i blocchi fotogrammetrici con immagini da aereo.

II.5.3.4 **Caratteristiche dei Ground Control Points (GCP)**

I punti di coordinate note utilizzati per l'orientamento (*Ground Control Points* - GCP), devono possedere le caratteristiche di seguito riportate:

- Distribuzione omogenea: i GCP devono essere distribuiti in modo da coprire l'intera immagine, per quanto possibile senza lasciarne porzioni sguarnite; in particolare è consigliabile distribuire alcuni GCP lungo il bordo dell'immagine, in corrispondenza degli angoli e del punto centrale di ogni lato, essendo la parte maggiormente soggetta a deformazioni.
- Localizzazione: i singoli GCP devono essere chiaramente identificabili e collimabili tanto nello spazio immagine quanto nello spazio oggetto, pertanto la loro scelta deve essere condizionata sia dall'effettiva visibilità sull'immagine, sia dalla possibilità di effettuare stazionamenti con ricevitori GNSS (GNSS) per ottenerne le coordinate. E' consigliata la loro dislocazione a quota terreno e possibilmente in corrispondenza di oggetti sufficientemente stabili sul territorio.
- Numero: il numero consigliato di GCP varia in base al sensore che ha acquisito l'immagine, al modello utilizzato per l'orientamento e, in generale, alle caratteristiche geometriche dell'acquisizione. Tuttavia una volta definito un sensore e un modello di orientamento è possibile individuare un numero minimo di GCP, superato il quale non si ottengono significativi miglioramenti della precisione del modello.

Per quanto riguarda i modelli basati sulle funzioni polinomiali razionali con RPC forniti nei metadati, lo scopo dei GCP è essenzialmente quello di stimare i coefficienti di una trasformazione di ordine zero (traslazione) o, meglio, di primo ordine (trasformazione affine) per raffinare l'orientamento. Conseguentemente da 3 a 5 GCP sono generalmente sufficienti.

Per quanto riguarda invece i modelli rigorosi (fisicamente basati), in generale, tale numero è variabile (approssimativamente tra 8 e 15) in funzione del sensore e del tipo di immagini (immagini grezze . Level 1A o proiettate sull'ellissoide . Level 1B).

Con riferimento all'usuale procedura di validazione (consentita da tutti i *software* commerciali) detta *Hold-Out-Validation* (vedi documento "Ortofoto Digitali alla scala nominale 1:10.000: Prescrizioni per l'utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione") (nella quale i GP vengono divisi in due sottoinsiemi aventi sostanzialmente uguali dimensioni, uno usato come GCP e l'altro come CP) e' possibile definire una procedura da utilizzare per ottenere questo numero minimo determinando il fondamento dell'RMSE (*Root Mean Square Error*) dei CP in funzione del numero di GCP usati ed eseguendo un *fitting* dei valori ottenuti mediante una curva esponenziale decrescente:

$$y = a \exp(bx^{-t})$$

dove y è l'RMSE dei CP, x è il numero di GCP usati per costruire il modello, a e b sono stimati con le loro deviazioni standard (σ_a , σ_b) mediante metodo dei minimi quadrati. Il valore di t è vincolato ad essere un intero positivo e calcolato iterativamente partendo da $t = 1$ e stimando i due coefficienti a (valore asintotico) e b . Se la differenza rispetto al valore asintotico a in corrispondenza della metà dei GP complessivamente disponibili $x = n_{GP}/2$ (ovvero $y(n_{GP}/2) - a$) risulta essere maggiore di una soglia prestabilita (es: > 1 cm, 5 cm) dipendente dalla risoluzione delle immagini utilizzate, il valore di t è incrementato di una unità e a e b sono stimate nuovamente. Quando tale condizione risulta soddisfatta, il valore $(a + 2\sigma_a)$ permette di determinare il numero minimo di GCP (\tilde{n}_{GCP}), uguale all'arrotondamento per eccesso del valore x corrispondente a $y = a + 2\sigma_a$:

$$\tilde{n}_{GCP} = \text{int} \sup \sqrt{\frac{b}{\ln(a + 2\sigma_a) - \ln a}}$$

Analogamente, con riferimento alla procedura di validazione alternativa maggiormente efficiente (i GP funzionano contemporaneamente come GCP e CP) e robusta (ma implementata solo in pochi *software* scientifici) detta *Leave-One-Out-Cross-Validation* (vedi documento "Ortofoto Digitali alla scala nominale 1:10.000: Prescrizioni per l'utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione") e' possibile definire una procedura del tutto analoga, nella quale per individuare il valore di t la differenza rispetto al valore asintotico a viene calcolata in corrispondenza del numero di GP complessivamente disponibili meno uno $x = (n_{GP}-1)/2$ (ovvero $y((n_{GP}-1)/2) - a$)

- Accuratezza: al fine di garantire un livello ottimale di accuratezza per il prodotto finale si consiglia la determinazione del posizionamento dei GCP mediante l'uso di rilievi GNSS (GNSS) eseguiti con strumentazione di classe geodetica anche in modalità RTK (eventualmente assistita da reti di stazioni permanenti per servizi di posizionamento in tempo reale), che garantiscono accuratezze dell'ordine di pochi centimetri. In caso di mancata disponibilità di misure GNSS (GNSS), il posizionamento dei GCP può essere determinato utilizzando cartografia a scala 1:1000, 1:2000, 1:5000 o al massimo 1:10000, avendo comunque cura di verificare che l'accuratezza

del posizionamento sia pari o inferiore a 3 m (tolleranza planimetrica per applicazioni cartografiche come indicato in II.1.9).

Per valutare la variazione dell'accuratezza del prodotto finale in funzione della qualità dei dati utilizzati come GCP sono state effettuate diversi orientamenti di una immagine IKONOS utilizzando dapprima GCP ottenuti mediante una campagna di misure GNSS (GNSS) RTK, quindi aggiungendo errori casuali alle loro coordinate planimetriche. In particolare sono state effettuate prove introducendo errori estratti da una variabile casuale distribuita come una normale con media zero e deviazione standard pari rispettivamente a 0.5, 1, 2 e 4 m. I risultati ottenuti sono riportati di seguito.

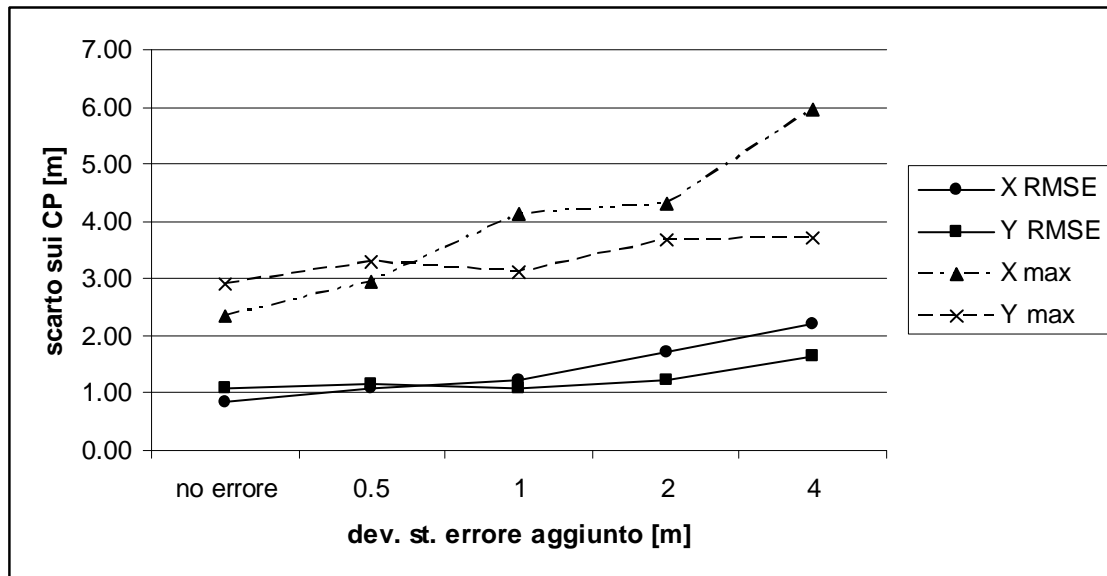


Figura 10 - Accuratezza del modello altimetrico in funzione dell'accuratezza dei GCP

Dalla Figura 10 si evince che l'accuratezza del prodotto finale è fortemente dipendente dall'accuratezza delle posizioni dei GCP, in particolare se gli errori medi superano il metro, confermando l'auspicabilità delle citate misure GNSS (GNSS) per la determinazione dei GCP.

II.5.3.5 Caratteristiche dei Check Points (CP)

I CP devono possedere le medesime caratteristiche dei GCP relativamente a distribuzione (II.5.3.5) e accuratezza, avendo anche cura che la localizzazione dei CP sia il più possibile complementare a quella dei GCP (ogni CP deve essere il più distante possibile dai GCP circostanti).

II.5.3.6 Qualità dei DSM da immagini satellitari ad alta e altissima risoluzione

Al fine di fornire alcuni dati relativi alla qualità dei DSM ottenibili da immagini satellitari ad alta e altissima risoluzione, si riportano i risultati di alcuni esperimenti, in parte eseguiti dal Prof. Karsten Jacobsen (*personal communication*) della Leibniz University di Hannover (Tabella 3).

E' importante notare che anche in questo caso è possibile mettere in evidenza una dipendenza dell'accuratezza dalla pendenza del terreno.

II.5.4 LA VERIFICA DI QUALITÀ

Per le procedure di controllo finale, si rimanda alle procedure di verifica contenute in II.1.9.

SENSORE	ZONA	TIPO DI STEREOCOPPIA	ACCURATEZZA (RMS) (m)			LIVELLO
			GLOBALE	AREE URBANE	AREE APERTE	
IKONOS	NAPOLI	CARTERRA-GEO (LEVEL 1B)			1.5	2 - 3
EROS A	TIVOLI (RM)	BASIC (LEVEL 1A)			5 - 6	0 - 1
QUICKBIRD	CASTELGANDOLFO (RM)	STANDARD ORTHOREADY (LEVEL 1B) NON SINCRONE			2	
QUICKBIRD	AUGUSTA	BASIC (LEVEL 1A)	2.5 - 3		1.1	2 - 3
CARTOSAT-1	varie stereocoppie	BASIC (LEVEL 1A)		2.5 - 4		

Tabella 13 - Indici di qualità dei DSM prodotti da satellite

III ORTOFOTO DIGITALI 10K

III.1 SPECIFICHE TECNICHE GENERALI

Le tipologie di ortofoto considerate sono sostanzialmente 3 e si rimanda al I.1 per quanto riguarda una definizione più approfondita:

- Tipo A: ortofoto orientate ad applicazioni prevalentemente cartografiche, distinte nei sottotipi:
 - A1: ortofoto ordinaria;
 - A2: ortofoto di precisione;
- Tipo B: ortofoto speditive per applicazioni prevalentemente tematiche e di comparazione con carte tecniche.

Le caratteristiche individuate per la maggioranza dei valori standard esposti sono identiche nei 3 gruppi (in tale caso si indica una sola caratteristica senza differenziazione tra le tipologie); qualora in base agli scopi specifici di applicazione delle ortofoto si sia ritenuto necessario differenziare i parametri, questi vengono dettagliati separatamente.

III.1.1 SISTEMA DI RIFERIMENTO

Nella produzione delle ortofoto digitali si prevede l'utilizzo del sistema di riferimento definito in base a:

- sistema geodetico (*Datum*) ETRS 89 nella realizzazione corrente (*Ellissoide WGS84*);
- rappresentazione conforme UTM (*coordinate cartografiche UTM/WGS84*).

Questo sistema di riferimento, detto *%nativo+*, si utilizza nelle singole fasi di produzione quali l'acquisizione dei dati, il rilievo sul terreno, la Triangolazione Aerea. L'ortofoto, generata nel sistema di riferimento geodetico cartografico nativo, potrà essere successivamente sottoposta a passaggi in altri sistemi di riferimento, utilizzando i *software* e i grigliati di trasformazione pubblicati dall'I.G.M. (come ad es. il VERTO_3) nella loro versione più recente.

Per la scelta del sistema di riferimento a livello Nazionale, che comunque deve coincidere con quello definito dalla rete dei punti noti presenti nell'area, si rinvia a quanto previsto da parte del progetto di ricerca *%lotto 1: Reti geodetiche+* del Centro Interregionale di Coordinamento e documentazioni per le informazioni territoriali.

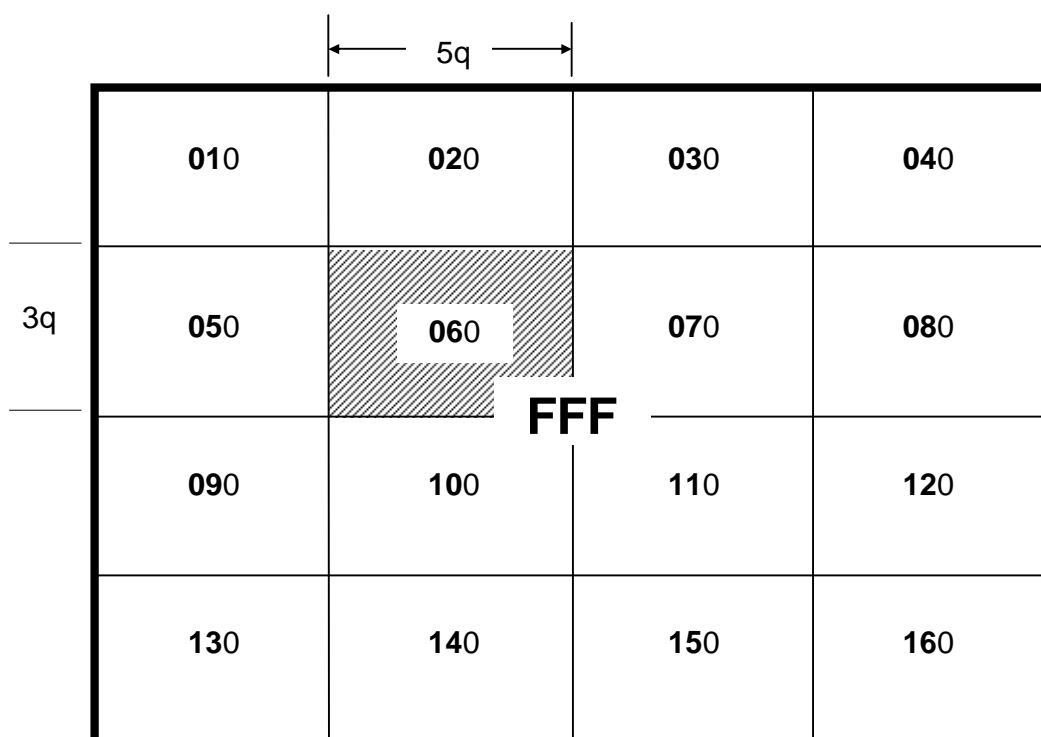
III.1.2 TAGLIO DEI FOGLI

Le ortoimmagini, pur essendo generate e visualizzabili in continuo su tutto il territorio rilevato, dovranno essere consegnate secondo una suddivisione in *file* separati.

Il taglio relativo all'ortofoto può essere realizzato secondo due modalità:

1. *taglio geografico* mediante le trasformate di meridiani e paralleli (longitudine e latitudine costanti);
2. *taglio cartografico* secondo rette appartenenti ad un reticolato cartografico (Est e Nord costanti).

A meno di esigenze particolari, legate ad eventuali riferimenti cartografici specifici, quali ad esempio quelli delle Carte Tecniche Regionali (CTR), il modulo minimo di produzione della ortofoto dovrà essere costituito dalla porzione di territorio, coperta da una Sezione a scala 1:10.000, inquadrato, come sottomultiplo, nella cartografia IGM a scala 1:50.000, in analogia alle definizioni della Commissione Geodetica Italiana. Ogni sezione dovrà corrispondere alla sedicesima parte di un foglio della serie IGM a scala 1:50.000. (vedi Figura 11).



FFF: nome del Foglio IGM 1:50000.

010, 020, ..., 160: Sezioni alla scala 1:10000. la cifra non in grassetto deve essere presente pari a 0. Nel caso di cartografia in scala 1:5000 tale cifra viene sostituita con (1, 2, 3, 4), in riferimento al quadrante in cui viene suddivisa la sezione 1:10000.

Figura 11 - Il modulo minimo di riferimento (la sezione 1:10000)

L'identificativo di ogni carta dovrà essere contraddistinto da un codice a sei cifre secondo lo stesso principio di codifica attualmente in uso nella redazione delle CTR, in modo da rendere semplice la ricerca del territorio corrispondente. Le stesse regole dovranno essere seguite dal Quadro d'insieme.

III.1.3 PROTOTIPO DI STAMPA DEI FOGLI

Per la stampa delle ortofoto digitali si adotta il formato UNI A1 (84,0 x 59,4 cm²) secondo il prototipo indicato, in modo da permettere un agevole utilizzo dell'elaborato stampato, una sua semplice manovrabilità e leggibilità, una immediata lettura delle caratteristiche principali mediante la bandella sul bordo destro del foglio e la cornice intorno all'ortofoto stessa.

Il rettangolo di taglio delle ortofoto contiene per intero, centrata, una Sezione 1:10.000 (vedi Figura 12). Ai bordi, in ogni *file*, vengono realizzate aree rese trasparenti allo scopo di evitare

fasce di sovrapposizione, ai fini di più agevoli accessi ai dati e visualizzazioni in continuo territoriale delle diverse sezioni.

Il taglio deve essere effettuato mediante coordinate dei vertici fornite dal committente.

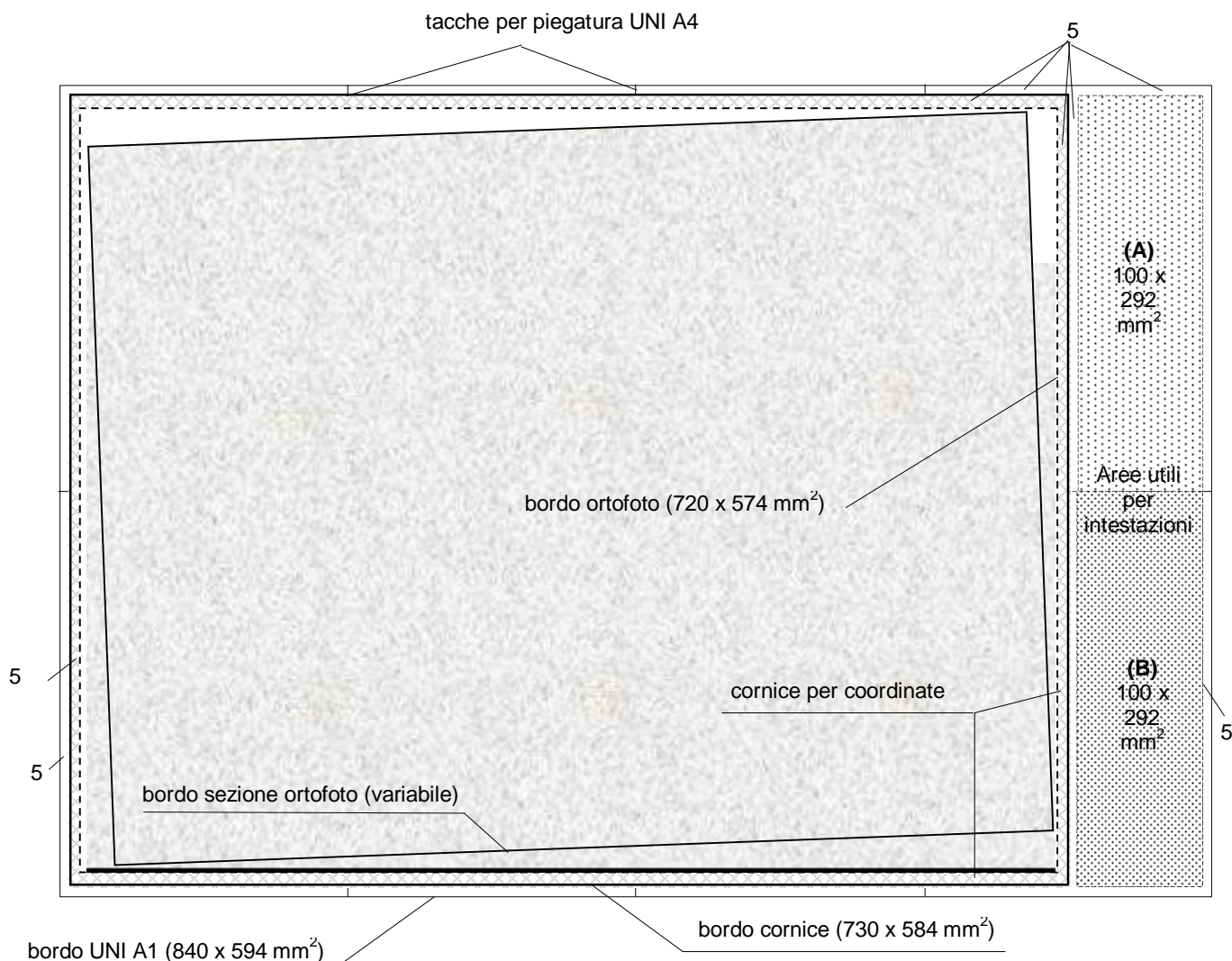


Figura 12 - Fac-simile di foglio-tipo (Sezione 1:10.000)

Nel caso in cui il formato indicato risultasse insufficiente (come certamente accade per la CTR delle Regioni meridionali), queste indicazioni dovranno essere modificate in base alle particolari esigenze che si presenteranno di volta in volta.

La bandella e la cornice dovranno riportare tutte le indicazioni che il Direttore dell'Esecuzione fornirà a mezzo di un appropriato disegno-prototipo, e dovrà riportare almeno i seguenti elementi:

- Lo schema dei limiti amministrativi;
- il grafico delle strisciate fotogrammetriche;
- la situazione cartografica disponibile alla varie scale;
- le coordinate dei vertici, in coordinate geografiche e piane, nei sistemi in uso;
- le indicazioni sul committente e sulla specifica produzione;
- l'indicazione grafica delle direzioni del Nord geografico e del Nord Cartografico.

Il dettaglio dei contenuti, il quadro di unione e l'identificativo di ogni foglio stampato (toponimo principale), e le eventuali modifiche del formato standard dovranno essere concordati in fase esecutiva. Si inserisce a titolo d'esempio uno schema indicativo della cornice in Figura 13.

III.1.4 TOLLERANZA PLANIMETRICA

Le tolleranze planimetriche T_{EN} per le varie tipologie di ortofoto sono contenute in Tabella 14. Si rimanda al glossario circa la definizione delle varie tipologie di ortofoto e le relative caratteristiche.

Occorre puntualizzare che per le ortofoto ordinarie e speditive, sono state definite due tolleranze planimetriche determinate del modello altimetrico utilizzato:

1. Una prima tolleranza più restrittiva, legata ai punti al suolo;
2. Una seconda tolleranza meno restrittiva (pari a 3 volte la tolleranza precedentemente definita) per i punti elevati rispetto al terreno come tetti di edifici, ponti, viadotti, tralicci e strutture artificiali analoghe.

Tipo di ortofoto	Elementi geometrici	Precisione grafica	Sqm planimetrico σ_{EN}	Tolleranza T_{EN} (CE95)
Speditiva (Tipo B)	Punti al suolo	0.3 mm	3 m	5.00 m
	Punti elevati rispetto alla superficie del terreno (tetti, viadotti,...)	0.9 mm	9 m	16.00 m
Ordinaria (Tipo A)	Punti al suolo	0.2 mm	2 m	3.50 m
	Punti elevati rispetto alla superficie del terreno (tetti, viadotti,...)	0.6 mm	6 m	11.00 m
Di precisione	Tutti i punti rappresentati	0.2 mm	2 m	3.50 m

Tabella 14 - Tolleranze planimetriche per le varie tipologie di ortofoto

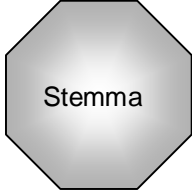
Nel caso dell'ortofoto di precisione, invece, tutti gli elementi rappresentati (anche quelli rilevati rispetto al terreno) devono soddisfare le tolleranze cartografiche tradizionali.

L'errore di posizione di questi punti elevati rispetto alla superficie del terreno dipende sia dalla quota relativa dal terreno, sia dalla distanza dal centro del fotogramma.

Il valore $T_{EN} = 1.7308 \sigma_{EN}$ corrisponde al valore CE95 indicato nelle normative mondiali standard ISO/TC 211 e ISO 19138 - Geographic information - Data quality measures - N 2029 del 5 giugno 2006 (211n2029) come indice di qualità di dati bivariati (x e y). Tale valore indica il raggio del cerchio centrato nella posizione planimetrica vera (teorica) che contiene le posizioni stimate con il 95% di probabilità. I valori di T_{EN} sono stati comunque arrotondati ai valori indicati in tabella.

Si rimanda al V.3.1.3 per approfondimenti sull'argomento.

Area intestazioni (A)



**ENTE
COMMITTENTE**
Servizio cartografico

Ortofoto digitale
Scala 1:10000

Sezione n. xxxyy0
TOPONIMO

Sistema di riferimento:
ellissoide WGS84-ETRS98 (realizz. ETRF98)
Rappresentazione cartografica: UTM-WGS84

Fonti:
ripresa aerea (o da satellite) del (DATA)
modello altimetrico di livello X del (ANNO)
generazione ortofoto nel (ANNO)

Direzione dei Lavori:

Ditta esecutrice:

Collaudo:

Area intestazioni (B)

Coordinate dei vertici

Tabella indicate le coordinate cartografiche e geografiche dei 4 vertici della sezione ortofoto nel sistema di riferimento attuale e nei sistemi di riferimento storici Gauss-Boaga e UTM-ED50

Quadri d'unione

Quadro d'unione dei fogli 1:50000 della GM con indicazione dei limiti amministrativi presenti in zona

Quadro d'unione delle sezioni 1:10000 di CTR con indicazione dei limiti amministrativi presenti in zona

Grafico di volo con schema delle strisciate

Indicazione Nord cartografico
Nord Geografico,

@ Regione NOME - Tutti i diritti di riproduzione, rielaborazione e vendita sono riservati

Figura 13 - Un esempio di cornice

III.1.5 RISOLUZIONE GEOMETRICA

La risoluzione geometrica, o spaziale, delle ortofoto è definita in base all'acuità visiva dell'occhio umano nella visione di una immagine digitale stampata alla scala nominale corretta che corrisponde mediamente a 250-400 dpi.

Tale risoluzione per ortofoto digitali alla scala nominale 1:10000 corrisponde alla dimensione del *pixel* al suolo (GSD) considerato quadrato con lato compreso tra 0,70 m e 1.01 m.

In base alla tipologia di ortofoto considerata, si possono definire il valore minimo per la risoluzione a cui corrisponde il valore massimo del GSD visibili in Tabella 15, validi per la produzione di ortofoto digitali in scala 1:10000.

L'assunzione della risoluzione geometrica condiziona una serie di fattori tra i quali l'acquisizione dei dati e il contenuto informativo richiesti.

Tipo di ortofoto	Risoluzione dpi	GSD (m)
Speditiva (Tipo B) Ordinaria A1	~ 254	m1.00
o di precisione A2	~ 423	m0.60

Tabella 15 - Risoluzione e GSD per ortofoto digitali

Il valore di riferimento di 1 m è tra quelli attualmente più in uso per scale 1:10.000 in Italia e deve essere il riferimento corrente da adottare in applicazioni tematiche (tipo B). I livelli inferiori della dimensione del *pixel* saranno adottati nel caso di esigenze specifiche di tipo cartografico.

III.1.6 RISOLUZIONE RADIOMETRICA

La risoluzione radiometrica è stabilita in funzione delle esigenze geometriche o tematiche dell'utilizzatore e della tipologia del dato spettrale (pancromatico, colore o multispettrale). I valori minimi di riferimento sono:

1. *8 bit per pixel per le ortofoto B/N o pancromatiche*, corrispondenti a 256 livelli di grigio. Questi valori radiometrici saranno rappresentati da una gamma di valori che va da 0 a 255, dove il valore zero rappresenta il nero e il valore 255 il bianco; tutti i valori intermedi sono tonalità di variazione di grigi dal nero al bianco;
2. *24 bit per pixel per le ortofoto a colori*, ovvero 8 bit per ogni banda cromatica principale (3 bande RGB: Red, Green, Blue) corrispondenti a 256 livelli di intensità per ciascuna banda. Questi valori radiometrici per ogni banda saranno rappresentati da una gamma di valori che va da 0 a 255, dove il valore zero rappresenta il valore minimo e 255 il valore di saturazione della banda considerata (massima intensità); tutti i valori intermedi sono tonalità di variazione dal minimo al massimo;
3. *$n \cdot 8$ bit per pixel per le ortofoto multispettrali e iperspettrali*, ovvero 8 bit per ogni banda radiometrica con n bande radiometriche utilizzate, corrispondenti a 256 livelli di intensità per ciascuna banda radiometrica, in analogia con le immagini a colori. Questi valori radiometrici per ogni banda saranno rappresentati da una gamma di valori che va da 0 a 255, dove il valore zero rappresenta il valore minimo e 255 il valore di

saturazione della banda considerata (massima intensità); tutti i valori intermedi sono tonalità di variazione dal minimo al massimo.

III.1.7 FORMATO DEI DATI DIGITALI

Nel caso di dati *raster* a referenza spaziale, come le ortofoto, possono essere utilizzati una serie di formati standard:

1. il formato più diffuso e consigliato è il formato standard Geo-Tiff nella versione *Baseline*. Le specifiche del formato Geo-Tiff sono standardizzate nel documento (GeoTIFF *specifications*);
2. il formato TIF con associato il file di georeferenziazione avente stesso nome dell'immagine digitale ma estensione TFW;
3. il formato JPeG con associato il file di georeferenziazione avente stesso nome dell'immagine digitale ma estensione JGW;
4. il formato ECW (*Enhanced Compression Wavelets*);
5. il formato JPeG2000.

Nella scelta del formato si tenga presente che:

- i formati 1,4,5 memorizzano all'interno dello stesso file sia la matrice immagine digitale sia le informazioni per una corretta georeferenziazione: sono pertanto auto-consistenti e preferibili agli altri;
- i formati 2,3 sono molto comuni ma le informazioni di georeferenziazione sono contenute in un file esterno all'immagine digitale: se si perde l'associazione tra questi due file si perde il corretto posizionamento cartografico dell'ortofoto;
- i formati 1,2, 5 possono essere compressi con tecnica *lossless* ovvero senza perdita di informazioni e quindi senza decadimento nella qualità del dato memorizzato;
- i formati 1,2,3 possono essere compressi con tecnica *lossy* basata sulla DCT (*Discrete Cosine Transformation*) che determina una perdita di informazione in fase di memorizzazione dell'immagine digitale: al fine di limitare tale decadimento di qualità, il rapporto di compressione deve essere minore di 8;
- il formato 4 e la versione *lossy* del formato 5 sono compressi con tecnica basata sulla DWT (*Discrete Wavelet Transformation*) che determina una perdita di informazione in fase di memorizzazione dell'immagine digitale: al fine di limitare tale decadimento di qualità il rapporto di compressione deve essere minore di 10.

III.1.8 DATA DEL RILIEVO

La data dell'ortofoto coinciderà con la data di acquisizione delle immagini digitali primarie (volo fotogrammetrico utilizzato o immagini da satellite) per la sua produzione.

III.1.9 METADATI

Per la strutturazione delle informazioni inerenti i metadati si rinvia a quanto prescritto nel documento: Repertorio Nazionale dei Dati Territoriali - Linee guida per l'applicazione dello Standard ISO 19115 *Geographic Information . Metadata* (LineeGuida_v.1)+. CNIPA.

III.1.10 PRODUZIONE DELLE ORTOFOTO DIGITALI

III.1.10.1 Requisiti delle immagini primarie

Le immagini necessarie alla produzione di ortofoto digitali possono provenire da acquisizione aerea (analogica o digitale) e da piattaforma satellitare.

Date le differenti specificità del processo di acquisizione a seconda che si tratti di immagini aeree o satellitari, e acquisite in modalità analogica o digitale, i requisiti associati a tali differenti tipologie vengono definiti con emissione di distinta documentazione.

Occorre comunque seguire le seguenti regole:

1. il GSD massimo delle immagini primarie (ovvero la dimensione massima del *pixel* delle immagini proiettato a terra) deve essere sempre minore di 4/5 della dimensione del *pixel* nell'ortofoto finale;
2. per la memorizzazione delle immagini primarie non è ammesso alcun tipo di compressione del tipo *lossy*: esse dovranno quindi essere memorizzate in formato TIFF non compresso o con compressione *lossless* (ad es. LZW), nel formato *lossless* del JPeG2000 o in altri formati non compressi.

III.1.10.2 Acquisizione indiretta mediante scansione di immagini analogiche

Nel caso in cui vengano utilizzate camere metriche fotografiche, i negativi dei fotogrammi dovranno essere sottoposti a digitalizzazione con una risoluzione non inferiore a quella indicata in Tabella 16 e comunque in grado di garantire le condizioni specificate al paragrafo precedente (GSD massimo).

Tipo di ortofoto	Risoluzione acquisizione	Dimensione del <i>pixel</i>
Speditiva (Tipo B)	800 - 1300	32-20 μm
Ordinaria (Tipo A) e di precisione	1200 - 1700	21-15 μm

Tabella 16 - Risoluzione per acquisizione indiretta

La scansione deve essere effettuata con *scanner* di alta precisione, che garantisca una ripetibilità geometrica di almeno $\pm 3 \mu\text{m}$ e una risoluzione geometrica ottica maggiore o uguale a quella di acquisizione: non è consentito incrementare la risoluzione di acquisizione mediante ricampionamento. Prima della scansione è necessaria una verifica della taratura dello *scanner*, sia per la geometria che per la radiometria.

È necessaria una verifica della taratura all'inizio e alla fine del lotto e/o ogni 2 settimane e/o ogni 2000 scansioni.

Nel caso la cattiva taratura dello scanner non permettesse di ottenere la ripetibilità precedentemente definita, la scansione non può essere accettata. Lo scanner deve quindi essere revisionato in modo da poter rispettare tali tolleranze.

La verifica radiometrica durante l'acquisizione dell'immagine (*dodging*) viene realizzata abitualmente per migliorare la qualità e l'uniformità dell'immagine stessa. I valori di luminosità dell'immagine possono deviare dai valori originali per interpolazione dei valori di luminosità

durante i processi di rettifica e di scansione. In ogni caso deve essere mantenuta il più possibile la corrispondenza radiometrica tra l'immagine digitale e l'originale.

La procedura di scansione deve poter essere verificabile: in fase di collaudo si controllerà che i file immagine siano ottenuti con risoluzione ottico-meccanica originale, cioè non abbiano subito alcun tipo di ricampionamento, in particolare quello atto a derivarli da una scansione a risoluzione inferiore.

III.1.10.3 Il modello altimetrico

Il modello altimetrico utilizzato deve seguire le regole stabilite nella Parte I del presente documento. In particolare per la produzione di ortofoto in scala nominale 1:10000 si utilizzano i modelli altimetrici secondo le regole:

- livello 6 o superiori per ortofoto di tipo A2 (ortofoto di precisione);
- livello 2 o superiori per ortofoto di tipo A1 (ortofoto ordinarie per applicazioni cartografiche);
- livello 1 o superiori per ortofoto di tipo B (ortofoto speditive tematiche) prodotte con immagini acquisite da piattaforma aerea;
- livello 0 o superiori per ortofoto di tipo B (ortofoto speditive tematiche) prodotte mediante immagini ad alta risoluzione acquisite da piattaforma satellitare;

Per ciascuno di questi casi si rinvia a specifica prescrizione nei documenti inerenti i modelli altimetrici.

III.1.10.4 Punti d'appoggio (GCP) e di controllo (CP)

Per svolgere le operazioni di orientamento esterno delle immagini digitali primarie è necessario determinare un insieme di punti d'appoggio (GCP = *Ground Control Point*) e di controllo (CP = *Check Point*). I risultati dell'orientamento esterno dipende anche dalla precisione con cui tali punti sono stati determinati.

In particolare si prescrive che i GCP e i CP siano definiti secondo le precisioni planimetriche (σ_{EN}) e altimetriche (σ_Q) indicate in Tabella 17.

Tipo di ortofoto	Sqm EN	Sqm Q
Speditiva (Tipo B)	0,50 m	0,75 m
Ordinaria (Tipo A) e di precisione	0,10 m	0,15 m

Tabella 17 - La precisione di GCP e CP per l'orientamento delle immagini primarie

In generale i GCP e i CP devono essere determinati mediante adeguate operazioni di rilievo topografico e geodetico sul terreno. Nel caso di applicazioni speditive e/o tematiche (tipo B) è ammesso l'utilizzo di GCP e CP estratti da cartografia numerica preesistente a grande scala e comunque a una scala nominale adeguata con le precisioni indicate in Tabella 17: tali punti possono essere denominati MCP (*Map Control Point*).

III.1.10.5 Orientamento esterno delle immagini digitali primarie

La determinazione dei parametri di orientamento esterno delle immagini primarie viene generalmente effettuata mediante un'operazione di triangolazione fotogrammetrica, intesa nell'accezione più ampia del termine (camere analogiche e camere digitali di tipo *frame*, camere digitali *pushbrum*, immagini acquisite da piattaforma satellitare). A meno di specifiche necessità dettate da peculiarità proprie della piattaforma di acquisizione ed elaborazione impiegate, la metodologia di calcolo che dovrà essere adottata è quella a stelle proiettive da cui derivano, per le immagini satellitari, i modelli rigorosi), o quella a modelli indipendenti. Per quanto riguarda il caso di immagini acquisite da piattaforma satellitare è possibile procedere anche secondo modelli non rigorosi utilizzando gli accorgimenti definiti al III.3.

Il numero di GCP e CP deve essere tale da garantire il rispetto delle tolleranze stabilite.

Tipo di ortofoto	V_{EN} sui GCP	V_Q sui GCP	V_{EN} sui CP	V_Q sui CP
Speditiva (Tipo B)	2.0 m	1.80 m	4.00 m	3.60 m
Ordinaria (Tipo A) e di precisione	1.00 m	0.90 m	2.00 m	1.80 m

Tabella 18 - Scarti residui massimi ammissibili su GCP e CP nella fase di orientamento

Gli scarti residui massimi ammissibili (v) sui GCP e sui CP in seguito alle operazioni di orientamento esterno sono riassunti in Tabella 18. Tali valori devono essere soddisfatti per almeno il 95 % dei GCP e dei CP utilizzati.

Nel caso in cui si utilizzino tecniche di fotogrammetria diretta (sistemi integrati GNSS-IMU) si stabiliscono le precisioni con cui devono essere determinati parametri di orientamento esterno delle immagini fotogrammetriche:

- le coordinate del centro di presa (N, E, Q) dovranno avere una precisione (sqm) di almeno ± 0.20 m;
- i parametri di orientamento dei fotogrammi dovranno avere le precisioni seguenti:
sqm , $= \pm 6$ mgon, sqm $k = \pm 9$ mgon.

III.1.10.6 Generazione dell'ortofoto e mosaicatura

L'ortorettifica deve essere realizzata adottando il modello altimetrico non sottoposto ad alcuna interpolazione preliminare.

Il metodo di ricampionamento delle immagini digitali da adottare è quello della $\frac{1}{2}$ convoluzione cubica.

Qualora esistano delle significative variazioni di luminosità e contrasto tra fotogrammi adiacenti devono essere eseguite delle operazioni di *stretching* che omogeneizzino le radiometrie di fotogrammi da mosaicare.

La mosaicatura, effettuata attraverso la fase di assemblaggio dei dati digitali delle singole immagini allo scopo di ottenere le dimensioni stabilite per l'ortofoto, deve garantire la congruenza radiometrica e geometrica interna. Essa dovrà avvenire con la costituzione di linee di taglio (*cut line*) che garantiscano la continuità degli elementi topografici tra i fotogrammi adiacenti e dovrà essere prodotta in formato vettoriale georiferito. Lo scostamento tra elementi geometrici corrispondenti a cavallo della linea di taglio non deve superare la tolleranza ammessa per l'ortofoto.

È opportuno, in questa fase, scegliere le *cut line* tra linee naturali che delimitano il passaggio netto tra superfici ad elevata differenza radiometrica, consentendo quindi di mascherare l'accostamento di immagini con diverse caratteristiche di luminosità e contrasto. Qualora non sia possibile eseguire tale scelta, le linee di sovrapposizione dovranno essere comunque individuate in modo da minimizzare le variazioni di tonalità.

In alcuni casi può essere applicato un filtraggio di *smoothing* lungo una predefinita fascia di sovrapposizione delle immagini al fine di rendere più omogeneo e graduale l'accostamento tra le immagini oggetto della mosaicatura. Tale miglioramento dei valori radiometrici deve essere localizzato e mirato esclusivamente a ridurre le differenze di tonalità nelle aree di unione tra le zone.

In fase di mosaicatura è opportuno l'utilizzo delle parti più centrali dei fotogrammi, che presentano in maniera meno evidente le deformazioni provocate dalle distorsioni da altezza, in modo da garantire le tolleranze indicate in Tabella 14.

I manufatti a sviluppo verticale notevole (edifici, torri ecc.) sottoposti a forti distorsioni prospettiche, dovranno appartenere a un solo fotogramma.

III.1.10.7 La ripresa aerea

Le riprese fotogrammetriche del territorio da rilevare devono possedere tutti i requisiti richiesti dalla tecnica più aggiornata per l'esecuzione dei rilievi a grande scala secondo le indicazioni contenute in II.3.2.3.

III.1.11 VERIFICHE DI QUALITÀ

Come già indicato in II.1.9 per i modelli altimetrici, le modalità di verifica di qualità si articolano essenzialmente in due fasi:

- Verifiche di qualità interna
- Verifiche sul prodotto finale.

III.1.11.1 Le verifiche di qualità interna

Le verifiche di qualità interna presuppongono il controllo di qualità di ciascuna fase operativa in cui si articola la produzione dei dati topografici, in genere eseguite in corso d'opera. Tali verifiche sono in buona parte legate alle varie tecniche produttive e possono essere solo in parte standardizzate in termini generali: nell'ambito di questo progetto sono state compilate apposite schede di descrizione delle varie tecniche di produzione in cui sono contenute le modalità per svolgere questi controlli.

Si indicano comunque alcuni controlli di qualità interna che permettono una verifica preliminare.

III.1.11.1.1 Verifica dei requisiti delle immagini di partenza

Occorre verificare che le immagini fotogrammetriche acquisite soddisfino le specifiche indicate in III.1.5, III.1.6 e III.1.7.

In particolare occorre verificare che:

- sia garantita la completa copertura monoscopica/stereoscopica dell'area in oggetto;

- le immagini soddisfino i requisiti geometrici contenuti in III.1.5 e in III.1.10.1;
- le immagini abbiano caratteristiche radiometriche sostanzialmente omogenee e soddisfino i requisiti radiometrici contenuti in III.1.6.

III.1.11.1.2 Verifica della procedura di scansione

Quando si usano tecniche di acquisizione indiretta delle immagini digitali, è necessario, in fase di collaudo, controllare che i file immagine siano ottenuti con risoluzione ottico-meccanica originale, cioè non abbiano subito alcun tipo di ricampionamento, in particolare quello atto a derivarli da una scansione a risoluzione inferiore;

III.1.11.1.3 Verifica di precisione su punti di controllo

Le operazioni di orientamento esterno delle immagini digitali primarie devono essere verificate in base ai residui sui punti di appoggio (GCP) e di controllo (CP).

In particolare tali residui devono essere minori delle tolleranze indicate in III.1.10.5.

III.1.11.1.4 Verifica della corrispondenza del modello altimetrico

Le procedure di produzione del modello altimetrico devono essere verificate attraverso i relativi metadati.

III.1.11.2 Le verifiche di qualità sul prodotto finale

Sul prodotto finale si devono eseguire sostanzialmente le verifiche di:

- Completezza: si valuta che le ortofoto fornite ricoprano l'area in oggetto, il formato dei dati sia corretto e leggibile, i metadati siano consistenti e corretti;
- Contenuto: si verifica che il sistema di riferimento utilizzato, la dimensione e il taglio dei fogli siano corretti, la risoluzione geometrica e il contenuto radiometrico siano sufficienti;
- Precisione: si controlla la precisione del contenuto dell'ortofoto.

Quest'ultima verifica della qualità, da eseguire al termine della produzione come verifica dei risultati prodotti, si attua mediante la determinazione di una rete di punti di controllo (CP) caratterizzata da precisione più elevata rispetto ai dati da verificare e impiego di punti geodetici esistenti (punti o caposaldi fissi).

Questa rete di CP può essere realizzata con tecniche di rilievo diretto (stazione totale, misure GNSS, etc.) che garantiscano precisioni di misura aventi accuratezza significativamente migliore (almeno 1 ordine di grandezza maggiore (0.40 m) rispetto alle tolleranze fissate T_{EN} . La verifica si svolge secondo la procedura seguente (già indicata in II.1.10.2 per i modelli altimetrici).

Indicando con:

- n il numero di punti di controllo;
- $E_{CP,i}$ $N_{CP,i}$ le coordinate planimetriche dei punti di controllo;
- $\sigma_{CP,E}$ $\sigma_{CP,N}$ gli scarti quadratici medi delle coordinate planimetriche dei punti di controllo;

si determina il valore del *circular error* al 95 % di probabilità dei punti di controllo $CE95_{CP}$:

$$CE95_{CP} = 1.7308 \sqrt{\sigma_{CP,E}^2 + \sigma_{CP,N}^2}.$$

Indicando con $E_{BR,i}$, $N_{BR,i}$ le coordinate dei punti del modello altimetrico corrispondenti ai punti di controllo, si determina il valore del *circular error* al 95 % di probabilità del modello altimetrico $CE95_{BR}$:

$$CE95_{BR} = 1.7308 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{BR,i} - E_{CP,i})^2 + (N_{BR,i} - N_{CP,i})^2}{n}}.$$

Si determina pertanto il valore dell'errore lineare complessivo $CE95_{EN}$ che deve risultare minore della tolleranza in planimetria fissata T_{EN} .

$$CE95_{EN} = \sqrt{CE95_{BR}^2 + CE95_{CP}^2} \leq T_{EN}$$

La verifica viene svolta su almeno il 5% dei fogli di ortofoto prodotti e dovrà coinvolgere per ogni foglio almeno:

- 20 dettagli planimetrici sul terreno;
- 20 particolari situati in posizione elevata.

Per la estrazione dei CP di collaudo finalizzata alla verifica di precisione, si possono impiegare, anche altri dati cartografici qualora disponibili, sufficientemente aggiornati e tali da garantire le precisioni planimetriche $\sigma_{CP,E}$ $\sigma_{CP,N}$ *m0.40 m*.

III.2 PRESCRIZIONI PER LA RIPRESA FOTOGRAMMETRICA

III.2.1 IL VOLO FOTOGRAMMETRICO

Il servizio deve essere eseguito nel rispetto della normativa vigente.

Le riprese aeree fotogrammetriche devono essere eseguite sulla base dei piani di volo predisposti con l'eccezione del rispetto delle variazioni di livello imposti dagli Enti di assistenza al volo, civili e militari.

Si dovrà concordare con l'ENAV (Ente Nazionale di Assistenza al Volo) e con il COFA (Comando Operativo Forze Armate), i piani di volo per ottenere tutte le necessarie autorizzazioni al sorvolo. Per le zone operative militari e le aree soggette a particolari norme restrittive della navigazione aerea, si dovrà ottenere il tempestivo rilascio delle particolari autorizzazioni.

III.2.1.1 Caratteristiche del volo

Fattori chiave per la determinazione del modello altimetrico per via fotogrammetrica sono la scala fotogramma, la percentuale di ricoprimento tra i fotogrammi, il periodo di volo previsto e la distribuzione dei punti di appoggio sul terreno.

Le riprese aerofotogrammetriche dovranno essere eseguite a colori e dovranno garantire la copertura stereoscopica corretta di tutto il territorio da rilevare e dovranno avere i requisiti propri della tecnica più aggiornata per l'esecuzione dei rilievi aerofotogrammetrici. Non è ammesso l'utilizzo di voli fotogrammetrici antecedenti la data dell'incarico.

Su richiesta della Committenza potrà essere richiesta anche la copertura nell'infrarosso in falso colore (su pellicola) o in singola banda NIR.

III.2.1.2 Caratteristiche dei velivoli

All'atto dell'esecuzione del volo, la Ditta verificherà la taratura e il funzionamento degli strumenti di volo e in particolare dell'altimetro di bordo. Il velivolo dovrà essere obbligatoriamente dotato di sistema di navigazione GNSS per poter eseguire correttamente il piano di volo progettato.

Nella realizzazione del volo è invece facoltativo l'impiego di:

- dispositivi inerziali (IMU) per l'acquisizione delle componenti angolari di presa;
- GNSS cinematico collegato in modo opportuno con la strumentazione di presa, al fine di determinare il posizionamento geodetico di precisione dei centri di presa.

Gli aeromobili devono essere in grado di operare a quote operative superiori a 6000 metri, idonee a garantire l'esecuzione di riprese aeree alla scala media 1:40.000 del fotogramma.

Gli aeromobili utilizzati a tale scopo devono essere regolarmente abilitati alla specifica attività ed essere in possesso delle Autorizzazioni all'effettuazione di sorvolo delle zone oggetto dell'appalto, secondo la legislazione vigente.

Ad oggi, queste autorizzazioni sono rilasciate dall'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile . Servizio Licenze . ai sensi degli ART. 788 e 793 del Codice di Navigazione, così come modificato dagli PAR. 3 e 4 del D.P.R. 29 settembre 2000, n. 367.

III.2.1.3 Caratteristiche delle camere da presa

Tutte le riprese dovranno essere eseguite con una sola tipologia di camera (fotografica o digitale); è ammesso l'uso di diverse camere della medesima tipologia per la realizzazione del volo.

In ogni caso le camere dovranno essere dotate di certificati di calibrazione di data non anteriore a due anni dalla data di esecuzione del volo.

È auspicabile che il sistema di presa sia dotato di FMC (*Forward Motion Compensation*), anche in forma digitale, per l'eliminazione del trascinamento (in particolare alle quote relative di volo più basse) e di cinerivometro per la correzione della deriva durante il volo.

III.2.1.4 Caratteristiche dei voli

Le camere digitali sono caratterizzate da una gran varietà di configurazioni geometriche (focale, risoluzione, abbracciamento) per cui è necessario riferire le considerazioni al parametro più generale definito dalla dimensione del *pixel* a terra (Ground Sample Distance = GSD).

Nella Tabella 8 sono contenuti i limiti del GSD per ortofoto di tipo A1, A2 e B. In funzione della geometria della camera sarà così possibile scegliere la quota relativa di volo e i vari parametri del volo.

Tipo di ortofoto	Risoluzione ortofoto dpi	GSD ortofoto (m)	GSD Fotogrammi (m)
Speditiva (Tipo B) Ordinaria A1	≥ 254	≤ 1.00	≤ 0.80
o di precisione A2	≥ 423	≤ 0.60	≤ 0.48

Tabella 19 - Risoluzione e GSD per ortofoto digitali

Il territorio potrà essere suddiviso in blocchi omogenei costituiti da insiemi di strisciate parallele. Il ricoprimento trasversale delle strisciate dovrà essere di norma pari al 20% e non potrà essere in nessun caso inferiore al 10%.

Nel caso in cui si utilizzino camere metriche fotografiche o camere digitali a prospettiva centrale unica:

- le variazioni, in valore assoluto, degli elementi angolari di orientamento dei fotogrammi adiacenti lungo ciascuna strisciata non dovranno mai superare 5 gon;
- il ricoprimento longitudinale fra fotogrammi di una stessa strisciata dovrà essere compreso fra il 55% e il 80%;
- il ricoprimento trasversale fra fotogrammi consecutivi della stessa strisciata non dovrà essere inferiore al 90%.

Nel caso in cui si utilizzino camere digitali *push-broom* è necessario che vengano rispettate le condizioni relative alla sovrapposizione trasversale: il ricoprimento trasversale delle strisciate dovrà essere di norma pari al 20% e non potrà essere in nessun caso inferiore al 10%.

In nessun punto dovranno comunque presentarsi soluzioni di continuità nella copertura stereoscopica delle zone assoggettate a ripresa.

I fotogrammi dovranno presentarsi nitidi e privi di foschia, di nubi e/o ombre da esse riportate e, per quanto possibile, di copertura nevosa.

III.2.1.5 Epoca dei voli

I voli dovranno essere eseguiti nelle ore a cavallo del mezzogiorno solare, in condizioni di raggi solari con elevazione non inferiore a 35°.

È necessario porre particolare attenzione nella scelta del periodo e dell'ora di volo, anche in funzione della tipologia di vegetazione prevalente: nel caso di costruzione del modello altimetrico con tecnica fotogrammetrica, deve essere prevista una corretta e completa costruzione del modello digitale anche nelle zone con fitta vegetazione: la presenza della vegetazione non può essere utilizzata come motivo per diminuire il livello di qualità metrica e interpretativa del prodotto finale.

La stagione di volo sarà generalmente l'estate (ammettendo quindi la presenza di fogliame) per il livello di precisione 0 e di preferenza senza fogli e per i livelli di precisione 1 o superiori.

III.2.1.6 Piano di volo

Prima di procedere all'esecuzione delle riprese aeree fotogrammetriche, la Ditta dovrà predisporre il piano di volo su base cartografica a scala 1:25.000 sul quale, per ogni strisciata, dovranno essere indicati:

- l'asse della strisciata, con i limiti (inizio e fine) della copertura stereoscopica;
- la sua codifica ipotizzata;
- la quota assoluta di volo prevista;

In una tabella allegata dovranno inoltre essere indicate, per ogni strisciata:

- la quota minima e la quota massima del terreno sorvolato;
- le corrispondenti scale minima e massima;
- il GSD minimo e massimo corrispondenti.

Per la progettazione del piano di volo si consiglia l'impiego di un modello altimetrico approssimato a piccola scala (livello 0 o livello 1) relativo all'area da rilevare e di idonei strumenti *software* di progetto.

Nel caso si vogliano determinare i centri di presa con GNSS cinematico, è necessario eseguire delle strisciate trasversali, per lo meno alle estremità del blocco, per irrigidire il legame fotogrammetrico fra i centri di presa di strisciate differenti.

Il piano di volo dovrà essere sottoposto all'approvazione del Direttore dell'Esecuzione, sentito il Collaudatore, prima della realizzazione delle riprese.

III.2.2 UTILIZZO DI TECNICHE DI FOTOGRAMMETRIA DIRETTA

III.2.2.1 La strumentazione GNSS a bordo e relative misure

Nel caso in cui si utilizzino camere digitali *push-broom* o nel caso in cui si preveda la misura diretta dei centri di presa, durante la ripresa è prescritto l'uso di un ricevitore GNSS, a doppia

frequenza, dotato di *input* fotogrammetrico capace di memorizzare, tramite opportuna interfaccia, un impulso emesso dalla camera all'istante di scatto; quest'ultimo va determinato con incertezza non superiore al millesimo di secondo.

L'acquisizione dei dati GNSS deve essere eseguita con una frequenza di misura superiore o uguale a 1 Hertz, con ricezione continua di almeno 5 satelliti e GDOP ≤ 5 .

Il rilievo dovrà essere corredato da una relazione che illustri le modalità di misura impiegate per la determinazione, con camera in assetto normale del vettore congiungente il centro di presa e il centro di fase dell'antenna GNSS, le componenti del vettore nel sistema immagine e i relativi σ .

Le componenti planimetriche relative alla posizione del centro di fase dell'antenna rispetto al centro di presa della camera fotogrammetrica devono essere $\leq 0,50$ m.

Per la validità del volo di ripresa di ciascun blocco occorre che, per almeno il 90% dei fotogrammi, sia possibile ricostruire la posizione del centro di fase dell'antenna all'istante di scatto dal trattamento GNSS delle misure di fase. In nessun caso è ammissibile che per una strisciata di bordo di un blocco risultino indeterminati più di cinque fotogrammi consecutivi e più del 30% delle posizioni.

Qualora le condizioni di cui sopra non siano rispettate, il volo dovrà essere ripetuto per le strisciate con le lacune più numerose, fino a rientrare nei limiti di cui sopra, ovvero si dovranno effettuare le operazioni di appoggio a terra necessarie per l'integrazione dei dati mancanti, ovvero la determinazione dei parametri di orientamento assoluto mediante triangolazione fotogrammetrica.

III.2.2.2 I sistemi inerziali

Nell'eventualità di uso di sistemi inerziali (INS o IMU) per la determinazione dei parametri angolari di orientamento esterno di ciascun fotogramma, essi devono essere caratterizzati da σ non superiore a ± 6 mgon per ω e ϕ e non superiore a ± 9 mgon per κ .

Dal trattamento dei dati rilevati dai sensori inerziali deve essere possibile la determinazione dei parametri angolari di orientamento esterno nel rispetto delle stesse percentuali definite per le coordinate dei centri di presa; in caso contrario si procederà analogamente a quanto ivi disposto.

Il complesso delle attrezzature fotogrammetriche, camera da presa e sistema GNSS/INS, deve essere sottoposto a calibrazione prima e dopo la esecuzione dei voli.

I dati di posizione e assetto determinati dall'uso di sistemi GNSS/IMU devono essere corredati da una relazione che illustri le modalità di misura impiegate per la determinazione, con camera in assetto normale (ω , ϕ e κ nulli), dei vettori congiungenti il centro di presa, il centro di fase dell'antenna GNSS e l'origine del sistema inerziale, le componenti dei vettori nel sistema immagine e i relativi σ .

I parametri di orientamento esterno saranno sottoposti a verifica di consistenza interna mediante il confronto tra le coordinate di punti nelle zone di sovrapposizione tra modelli consecutivi e tra modelli appartenenti a strisciate contigue, determinati in ciascun modello formato indipendentemente con i parametri dei fotogrammi che lo compongono.

III.2.2.3 Le stazioni a terra

Nell'eventualità di uso di sistemi inerziali (GNSS/IMU) per la determinazione dei parametri angolari di orientamento esterno di ciascun fotogramma, durante le riprese devono essere attivati sul terreno almeno tre ricevitori con le medesime caratteristiche di quello a bordo. Le distanze tra i ricevitori fissi devono essere superiori a 10 km, mentre quelle tra il vettore aereo e il ricevitore fisso più vicino non devono superare i 50 km. I tre ricevitori devono essere in stazione su vertici IGM95 o su vertici determinati mediante la misura di almeno due linee di base che li colleghino ai più vicini vertici della rete IGM95; ciascuno deve tracciare almeno 5 satelliti tra quelli ricevuti sull'aereo.

Poiché le stazioni di riferimento a terra consentono di determinare tre soluzioni indipendenti per ciascun centro di presa, è possibile, giustificando le scelte fatte, definire la posizione impiegando una combinazione lineare delle tre posizioni.

III.2.3 MATERIALE DA CONSEGNARE AL TERMINE DEL VOLO

La Ditta dovrà presentare a collaudo tutta la documentazione relativa al volo fotogrammetrico eseguito, e in particolare:

- relazione descrittiva in lingua italiana delle procedure seguite;
- verbale di controllo di qualità interna del volo che contenga i punti indicati nei controlli di qualità;
- autocertificazione della data (o delle date) di effettuazione del volo;
- certificati di taratura delle camere da presa;
- se si utilizza strumentazione per la georeferenziazione diretta (GNSS/IMU), i *report* di calibrazione prima e dopo l'esecuzione del volo;
- grafico del volo alla scala 1:25.000, su carta lucida e su rotolo continuo per tutta la lunghezza delle strisciate, riportante le coperture dei fotogrammi alterni lungo le strisciate e l'indicazione del limite dell'area da rilevare;
- tre *file* in formato DXF (*Data Exchange Format* di Autodesk) o in formato SHP (*Shapefile* di Esri) contenenti le informazioni relative ai grafici di volo per l'intero territorio servito:
 - assi di volo
 - centri di presa
 - abbracciamento al suolo dei fotogrammi;
- adeguati supporti (*hard-disk* rimovibili, DVD, o) contenenti le immagini digitali originali in formato TIFF/LZW.

III.2.4 IL CONTROLLO DI QUALITÀ

La validazione deve essere effettuata attraverso il controllo:

- della strumentazione utilizzata;
- delle procedure utilizzate.

Le verifiche devono essere effettuate attraverso l'esame dei *report* relativi al materiale, alla strumentazione e alle elaborazioni.

III.2.4.1 Il controllo della strumentazione

La camera fotogrammetrica e il velivolo devono rispondere alle prescrizioni descritte in precedenza. I vari controlli devono essere effettuati attraverso il certificato di calibrazione.

Nel caso in cui si preveda l'utilizzo di GNSS per la determinazione dei centri di proiezione e/o di strumentazione INS/IMU per la determinazione dell'assetto angolare, la ditta appaltatrice ne dovrà produrre il certificato di calibrazione.

Il sistema di georeferenziazione diretta delle immagini fotogrammetriche deve essere calibrato prima e dopo l'esecuzione del volo in oggetto. La verifica di questa fase si attua analizzando i report di calibrazione del sistema GNSS/IMU effettuati prima e dopo il volo.

III.2.4.2 Il controllo di qualità interna

Immediatamente dopo il volo di ripresa la Ditta controllerà la qualità delle immagini e invierà una relazione al Committente. Il verbale di controllo di qualità interna del volo dovrà fornire informazioni, fra l'altro, sui seguenti punti:

- “ foschia e altri fattori che influenzano la qualità dell'immagine;
- “ controllo dei valori di densità ottica dei fotogrammi;
- “ controllo di nitidezza delle immagini;
- “ determinazione degli stiramenti della pellicola in alcuni fotogrammi significativi (inizio di una strisciata, inizio di un nuovo rullo di pellicola...)
- “ visibilità degli eventuali punti segnalizzati
- “ relazione tecnica generale, comprendente le specifiche fornite per l'esecuzione del volo di ripresa.
- “ rispetto del piano di volo, in particolare degli assi delle strisciate;
- “ sovrapposizione longitudinale e trasversale minima ed eventuali lacune nella copertura;
- “ lacune dovute a copertura nuvolosa;

In caso di inosservanza delle prescrizioni tecniche, il volo di ripresa deve essere ripetuto, parzialmente o interamente, in relazione ai difetti riscontrati.

III.2.4.2.1 Il collaudo del volo

Nel caso in cui siano state utilizzate camere metriche digitali a prospettiva centrale unica, verranno eseguite le verifiche su un campione di immagini non superiore al 5%, al fine di verificare i valori assoluti e le variazioni tra fotogrammi contigui dei parametri angolari di orientamento esterno.

Nel caso in cui siano state utilizzate camere metriche digitali a prospettiva centrale multipla, il collaudo consisterà nell'analisi dei documenti di post-elaborazione e nella verifica mediante restituzione delle coordinate di almeno cinque punti determinati con operazioni di posizionamento GNSS a terra, per un numero di mappe in percentuale non superiore al 5% del totale delle mappe oggetto della presa (secondo il taglio standard) .

In tutti i casi verranno verificate le scale medie e minime (o, nel caso di camere digitali, la dimensione a terra dei pixel), la copertura stereoscopica completa del territorio oggetto del rilievo e la completa assenza di nubi e ombre da esse riportate.

III.2.4.2.2 Le misure GNSS per la determinazione dei centri di presa

Le misure GNSS per la determinazione dei centri di presa devono rispondere alle prescrizioni indicate in precedenza. In particolare in fase di validazione devono essere verificati:

- La documentazione fornita contenenti i report delle misure delle *baseline* effettuate in campagna e le relative schede di stazione, il calcolo di compensazione ecc. secondo III.2.3;
- le acquisizioni della strumentazione GNSS devono permettere un corretto posizionamento cinematico del velivolo entro le accuratezze stabilite. In particolare occorre analizzare:
 - la bontà delle configurazioni satellitari del ricevitore GNSS posto sul velivolo e dei ricevitori a terra (almeno 3): coperture satellitari con almeno 5 satelliti e andamento del GDOP con valori sempre minori di 5;
 - la correttezza del posizionamento: le posizioni devono essere determinate sempre ad ambiguità fissata ad un intero per la gran parte del percorso (almeno il 90%) e occorre confrontare le traiettorie indipendentemente determinate (almeno 3) con le stazioni GNSS fisse a terra (almeno 3). Le differenze tra queste traiettorie permettono di valutare la congruenza tra le acquisizioni effettuate (che deve essere sufficiente per soddisfare le accuratezze previste) e di scegliere infine la soluzione ottimale (III.1.10.5);
- Le accuratezze delle coordinate dei centri di presa della camera fotogrammetrica stimate in fase di elaborazione devono soddisfare i limiti indicati in III.1.10.5;
- La correttezza dell'applicazione del più recente modello di geoidi messo a disposizione dall'IGM per la determinazione delle quote ortometriche (III.1.1) dei centri di presa.

III.2.4.2.3 La georeferenziazione diretta

Nel caso di georeferenziazione diretta occorre effettuare tutti i controlli prescritti al III.2.4.2.2.

L'unica differenza consiste nel fatto che alle traiettorie da verificare deve essere aggiunta quella ottenuta dalla compensazione congiunta GNSS-IMU.

Inoltre, è necessario analizzare:

- i *report* della triangolazione di lisciatura dei parametri di orientamento ricavati direttamente che devono soddisfare i requisiti descritti in III.1;
- la presenza di eventuali sistematici mediante verifica con reti di controllo a terra (GCP).

III.3 PRESCRIZIONI PER L'UTILIZZO DI IMMAGINI SATELLITARI AD ALTA RISOLUZIONE

III.3.1 L'ACQUISIZIONE DEL DATO

Le procedure descritte di seguito si applicano ad immagini almeno radiometricamente corrette, o comunque a livelli di pre-processamento che non includano l'ortorettifica (IV.2).

La risoluzione minima considerata è pari a 1 m (pertanto si considerano le piattaforme satellitari che forniscono immagini con risoluzione pari o inferiore a 1 m, IV.2).

Nella fase di acquisizione devono essere considerate le seguenti caratteristiche, che devono essere richieste al momento della richiesta dell'immagine alla società distributrice:

- ✓ assenza di copertura nuvolosa
- ✓ angolo di *off-nadir* inferiore a 15°
- ✓ metadati allegati.

Il primo aspetto è ovvio e non sarà ulteriormente commentato.

Per il secondo aspetto si ricorda che la deformazione dell'immagine è dipendente dall'angolo di presa, ovvero dalla deviazione dalla presa nadirale. Al diminuire dell'angolo di *off-nadir* diminuisce la deformazione dovuta all'inclinazione del sensore rispetto al terreno, pertanto un'immagine acquisita con angolo di *off-nadir* pari a 0° sarà ottimale da questo punto di vista.

Infine i metadati relativi alle caratteristiche del sensore e alla presa dell'immagine saranno utilizzati sia durante le procedure di ortorettifica qui descritte sia come base per definire i nuovi metadati da allegare al prodotto finale. Per la strutturazione delle informazioni inerenti ai metadati finali si rinvia a quanto prescritto in III.1.

III.3.2 DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI ORTORETTIFICA

Il processo di ortorettifica è compiuto attraverso l'utilizzo di modelli funzionali tra lo spazio immagine e lo spazio oggetto (terreno).

I modelli utilizzabili per l'ortorettifica di immagini satellitari ad alta risoluzione sono:

- ✓ Funzioni Razionali (*Rational Polynomial Functions* . RPF) con l'ausilio dei coefficienti (*Rational Polynomial Coefficients* . RPC) eventualmente forniti con i metadati dell'immagine satellitare
- ✓ Modello rigoroso (o parametrico)

III.3.2.1 Funzioni razionali mediante RPC

Il modello a funzioni razionali utilizza un rapporto tra polinomi di ordine variabile per modellare la relazione tra coordinate a terra e coordinate immagine. Se non si hanno a disposizione i coefficienti (RPC) forniti con l'immagine, il numero di punti noti a terra (GCP) necessari alla loro stima è elevato e la correzione delle distorsioni avviene solo nell'intorno dei punti. In questo caso il modello risulta essere sensibile alla distribuzione dei GCP:

un'immagine troppo estesa dovrà quindi essere suddivisa in sottozone da correggere separatamente.

Pertanto questa metodologia è consigliata solo se si hanno a disposizione i coefficienti RPC, nel qual caso il numero di punti a terra noti necessari sarà notevolmente inferiore e i risultati potranno soddisfare i requisiti relativi alle presenti specifiche. Bisogna però tener presente che si sta utilizzando un modello a "scatola chiusa", quindi meno controllabile, in quanto i coefficienti sono forniti dalla società che gestisce il satellite senza alcuna spiegazione riguardo a come siano stati ottenuti.

III.3.2.2 Modello rigoroso

L'applicazione di un modello rigoroso, o parametrico, consente di modellare l'intero processo fisico-geometrico di acquisizione. Questo risulta possibile unicamente se si hanno a disposizione i metadati riguardanti i parametri orbitali, gli angoli d'assetto del sensore e i suoi parametri di orientamento interno: tutto ciò è utilizzato per ricostruire il segmento orbitale relativo alla presa delle immagini da ortorettificare.

I modelli rigorosi tengono poi conto della rifrazione atmosferica e della curvatura terrestre in modo da stabilire una relazione tra coordinate a terra e coordinate immagine che descriva il meglio possibile la realtà.

Ciascun satellite ad alta risoluzione necessita di uno specifico modello rigoroso sviluppato *ad hoc*; i *software* che prevedono l'ortorettifica di immagini satellitari ad alta risoluzione usualmente includono i modelli rigorosi relativi ai principali satelliti in orbita.

III.3.3 DATI AUSILIARI NECESSARI

Il processo di ortorettifica necessita dell'utilizzo dei seguenti dati ausiliari:

- ✓ Modello digitale del terreno (DTM . *Digital Terrain Model*) o di superficie (DSM . *Digital Surface Model*) (vedi II.1)
- ✓ Punti a terra di coordinate note (definiti rispettivamente *Ground Control Points* o *Check Points* a seconda che siano usati per il calcolo del modello o per la sua validazione)

III.3.3.1 Caratteristiche del modello altimetrico per l'ortorettifica

Per quanto concerne le caratteristiche del modello altimetrico da utilizzarsi per l'ortorettifica si rimanda a quanto descritto in III.1.10.3 con particolare riferimento alla definizione dei livelli 2 e 1.

Qualora disponibile, si raccomanda l'utilizzo di un DSM denso soprattutto in presenza di edifici od oggetti di altezza rilevante con generazione di ortofoto di precisione (V.2.3).

Come esempio di miglioramento del prodotto nel caso di utilizzo di dati DSM denso si riportano di seguito alcuni risultati di un confronto effettuato tra un'immagine IKONOS ortorettificata utilizzando un comune DEM (risoluzione 20 m . Figura 14) e la medesima immagine ortorettificata utilizzando un DSM LiDAR (risoluzione 2 m . Figura 15).

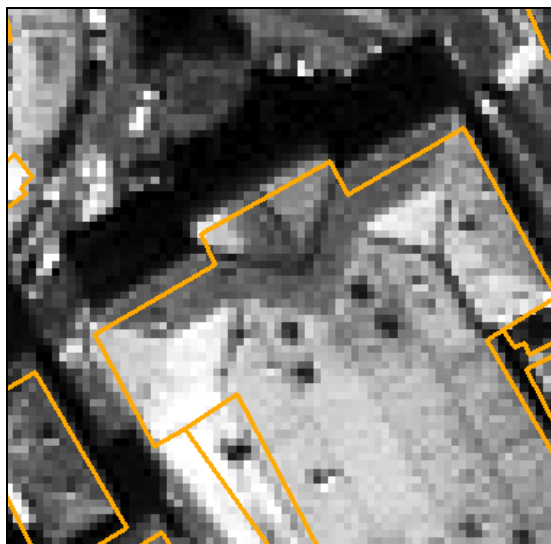


Figura 14 - Ortoimmagine realizzata con l'ausilio di un DEM (20m x 20m)

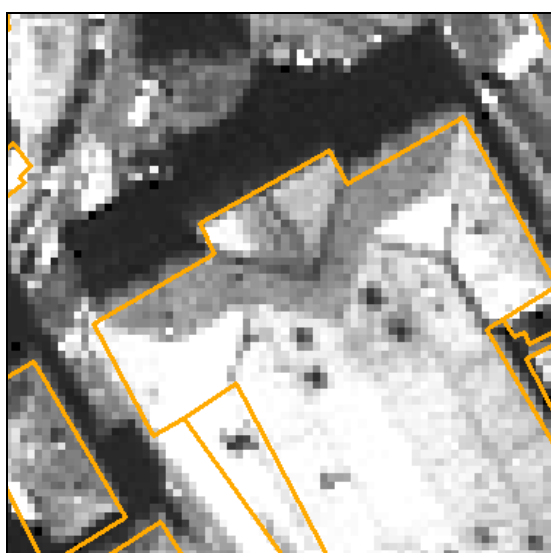


Figura 15 - Ortoimmagine realizzata con l'ausilio di un DSM (2m x 2m)

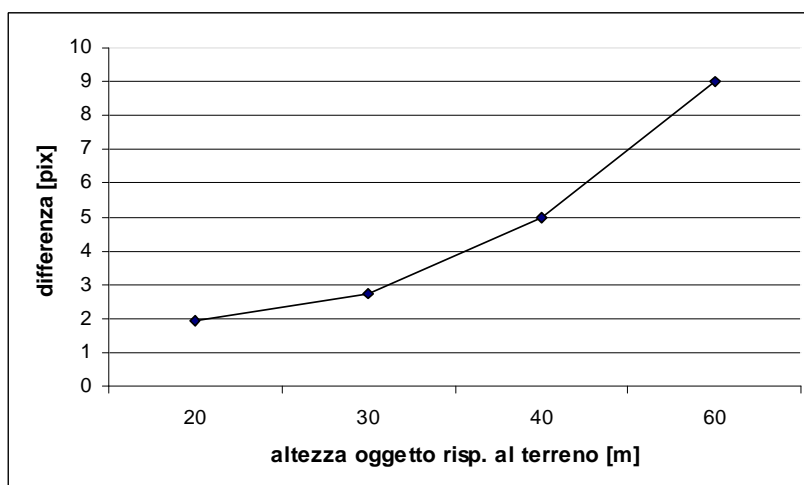


Figura 16 - Differenza in pixel tra le ortofoto realizzate tramite DSM e DEM

La differenza riscontrata tra l'ortoimmagine realizzata mediante DSM e quella realizzata mediante DEM cresce all'aumentare dell'altezza degli oggetti rispetto al terreno (Figura 16). Inoltre si può verificare la maggior accuratezza dell'ortoimmagine realizzata mediante DSM confrontandola con la carta comunale vettoriale in scala 1:2.000 sovrapposta all'immagine nelle Figura 14 e Figura 15.

III.3.3.2 Caratteristiche dei Ground Control Points (GCP)

I punti di coordinate note che saranno utilizzati direttamente per il calcolo del modello di orto rettificazione (GCP) devono possedere le caratteristiche indicate in II.5.3.4.

III.3.4 VALIDAZIONE DEL PRODOTTO

Il prodotto finale viene verificato mediante i controlli definiti in III.1.11.

III.3.4.1 Caratteristiche dei Check Points (CP)

I CP devono possedere le medesime caratteristiche dei GCP relativamente a distribuzione e posizionamento (v. III.3.3.2), avendo anche cura che la dislocazione dei CP sia il più possibile complementare a quella dei GCP (ogni CP deve essere il più distante possibile dai GCP circostanti).

Si consiglia di utilizzare un numero di CP pari o superiore a quello dei GCP.

L'accuratezza dei CP non deve essere inferiore a quella dei GCP.

III.3.4.2 Metodi di validazione supplementari

È possibile effettuare la validazione utilizzando due diversi metodi:

- ✓ *Hold out validation*: è la metodologia tradizionale, che prevede l'utilizzo di due insiemi separati di punti, uno per il calcolo del modello (GCP) e uno per la sua validazione (CP). L'accuratezza del prodotto finale è calcolata come il CE90 degli scarti sui CP.
- ✓ *Leave-one-out cross-validation*: è una metodologia alternativa che permette di valutare l'accuratezza del prodotto finale anche in assenza di un insieme separato di dati da usarsi come CP. Il modello di ortorettificazione è applicato iterativamente usando tutti i punti disponibili come GCP tranne uno, diverso ad ogni iterazione, usato come CP. L'accuratezza del prodotto finale è calcolata come il CE90 sugli scarti ottenuti sui CP considerando tutte le iterazioni.

Questa metodologia, oltre ad essere applicabile anche con un numero ridotto di punti a terra noti, risulta essere meno sensibile alla presenza di errori grossolani rispetto alla *Hold out validation*.

IV CARATTERISTICHE DEI SENSORI ATTUALI

IV.1 CAMERE DIGITALI ATTUALI E RELATIVI PRODOTTI OTTENIBILI

Con l'avvento delle tecniche digitali, anche la fotogrammetria, e di conseguenza la generazione di ortofoto, ha subito questa trasformazione sostanziale.

Il passaggio dall'analitico al digitale ha innanzitutto coinvolto gli strumenti di restituzione nel tentativo di semplificare le procedure e automatizzare il processo fotogrammetrico: ad esempio, la produzione di ortofoto digitali ha subito un notevole impulso grazie ai significativi livelli di automazione raggiunti, che ne hanno consentito una sensibile riduzione dei costi e quindi una diffusione sempre più rilevante.

La commercializzazione di camere digitali ad altissima risoluzione, da montare su piattaforma aerea, ha permesso di generare direttamente in fase di acquisizione il dato immagine digitale senza quelle perdite di tempo e di qualità proprie dell'acquisizione indiretta (scansione) di fotogrammi analogici, comportando un'evoluzione sostanziale per quanto riguarda l'univocità e la conservazione della metricità dell'immagine.

Infatti, una delle principali caratteristiche della fotografia digitale è quella di catturare l'immagine del territorio in formato numerico e di trasmetterla e conservarla nel tempo senza alterazioni. In altre parole al momento della presa si determina in modo univoco il rapporto tra la posizione di un punto nello spazio e la sua immagine e questo rapporto rimane immutato nel tempo ed è univoco per chiunque utilizzi l'immagine.

L'introduzione delle camere digitali (e quindi delle immagini digitali) e la diffusione delle tecniche di fotogrammetria diretta porterà, già nel breve periodo, ad un abbattimento dei costi delle riprese, sia terrestri che aeree, delineandosi sempre più come tecnica ottimale la produzione di ortofoto digitali alla scala nominale 1:10.000.

Non si dimentichi che i contenuti multi-spettrali spesso disponibili utilizzando questo tipo di dato permettono di svolgere in modo più definito e preciso analisi ambientali e tematiche.

Il presente documento ha l'obiettivo di definire le caratteristiche delle principali camere digitali a medio e grande formato da montarsi su piattaforma aerea e le caratteristiche sostanziali delle immagini che esse sono in grado di acquisire.

IV.1.1 LE CAMERE DIGITALI

IV.1.1.1 I sensori

Le camere fotografiche digitali possono avere strutture molto diverse, ma, allo scopo di chiarire alcuni concetti fondamentali sulla tecnica che permette di acquisire l'immagine di una scena in forma digitale, considereremo per ora la struttura di una camera digitale che sia concettualmente il più possibile simile a una camera fotografica tradizionale.

Prendiamo cioè in considerazione una camera digitale con la quale la scena viene ripresa in modo istantaneo attraverso un obiettivo da un unico punto dello spazio e nella quale l'elemento che raccoglie l'immagine sul piano focale è un sensore, cioè un dispositivo

elettronico che descriveremo tra breve e che, possiamo dire, svolge quella funzione di cattura e memorizzazione dell'immagine che veniva svolta dalla tradizionale pellicola.

Il sensore fa parte del *chip* elettronico che è l'elemento fondamentale della camera digitale. Esistono oggi due tipi di *chip* elettronici che vengono utilizzati dalle camere digitali: il CCD, *charged-coupled device* e il C-MOS ; il CCD è quello più diffuso nelle applicazioni comuni. I sensori CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) sono in genere utilizzati in applicazioni specifiche come telecamere normali e ad alta velocità, camere digitali professionali ma non sono utilizzati nelle camere fotogrammetriche digitali, e quindi non ne parleremo.

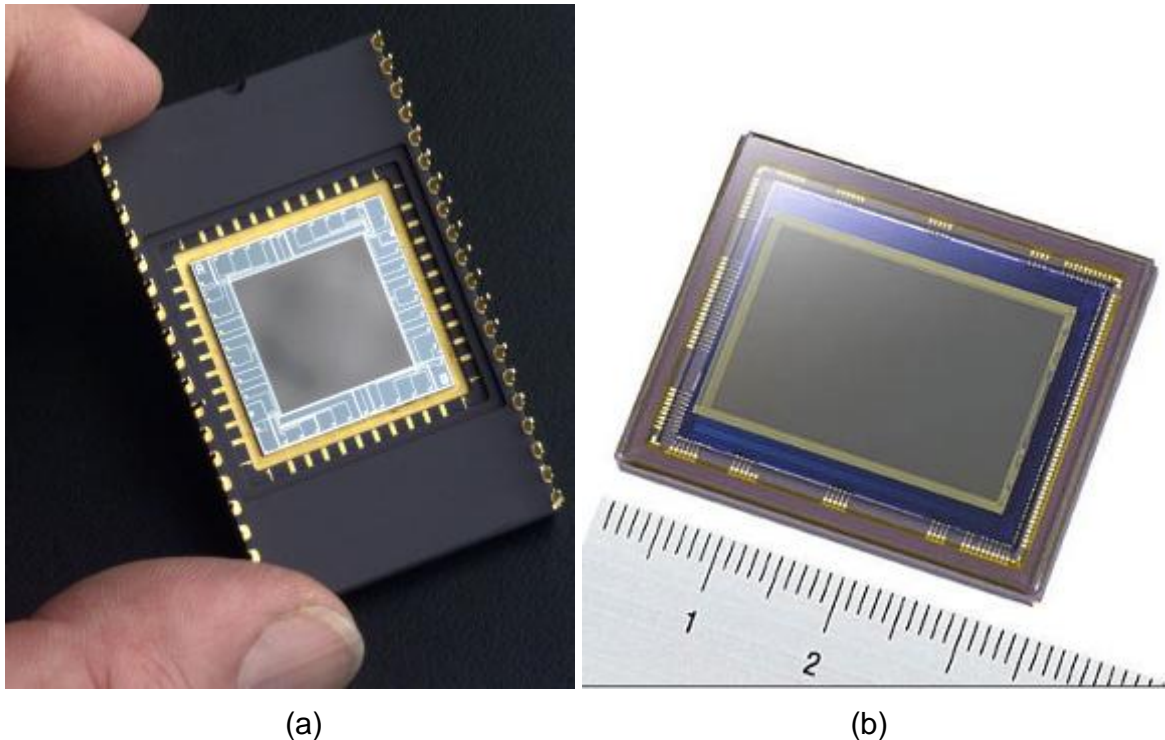


Figura 17 - Esempi di sensori (a) CCD e (b) CMOS

L'invenzione del CCD, *charged-coupled device*, che in italiano significa "dispositivo ad accoppiamento di carica", è avvenuta all'inizio degli anni '70 nei laboratori della Bell. Alcune volte il CCD viene anche detto dispositivo "a trasferimento di carica" poiché i *pixel* che lo compongono, oltre a svolgere la funzione di trasformare l'energia della luce incidente su di essi in una carica elettrica, svolgono anche la funzione di trasferirla in modo sequenziale dall'uno all'altro. Il CCD ha non solo la funzione di catturare l'immagine che si forma sul sensore, ma anche quella di trasformarla in una matrice di numeri e memorizzarla su un supporto elaborabile da un *computer*.

Nel tipo di camera digitale che stiamo considerando per introdurre l'argomento, il sensore è costituito da una piastrina di silicio, quadrata o rettangolare, sulla quale è inciso un fitto grigliato che la suddivide in tanti elementi quadrati: i *pixel*. Questi possono essere anche di forma rettangolare, ma ora e nel seguito, per semplicità di trattazione, considereremo che essi siano di forma quadrata. Un sensore così fatto, cioè costituito da un grigliato, quadrato o rettangolare, di tante linee e colonne di *pixel*, viene detto di tipo "a matrice" o, con terminologia anglosassone, di tipo *area array*.

Si chiamano invece "lineari", o *linear array*, i sensori formati da una unica riga di *pixel*.

Ogni *pixel* corrisponde a un fotodiodo la cui risposta alla luce incidente è analoga a quella che viene data da una pellicola pancromatica in bianco e nero; in altre parole la carica di elettroni prodotta da un generico fotodiodo sarebbe generata da tutta la banda spettrale della luce incidente sul fotodiodo stesso. Quindi, una volta trasformate le cariche di elettroni in una matrice di numeri, questa matrice potrebbe dar luogo, con un passaggio dal digitale all'analogico, solo a una immagine in bianco e nero.

Per acquisire una immagine digitale che possa dar luogo a una sua visualizzazione equivalente a una fotografia a colori, è necessario quindi separare la luce incidente nelle tre componenti primarie RGB (*Red, Green, Blue*, per usare la terminologia anglosassone) e registrarne l'energia fotonica corrispondente con tre valori ad essa corrispondenti.

Per far sì che un fotodiodo registri, ad esempio, solo la quantità di energia che corrisponde alla banda del blu della luce che su di esso incide, occorre stendere su di esso un filtro che faccia passare solo la banda del blu; in tal modo lo stesso fotodiodo sarà insensibile alla parte della luce che corrisponde alle bande del verde e del rosso.

Per poter registrare una scena suddividendo la luce che da essa proviene nei tre colori primari occorre allora dedicare una parte dei *pixel* del CCD alla registrazione delle onde elettromagnetiche che corrispondono al colore primario rosso, una al verde e una parte al blu.

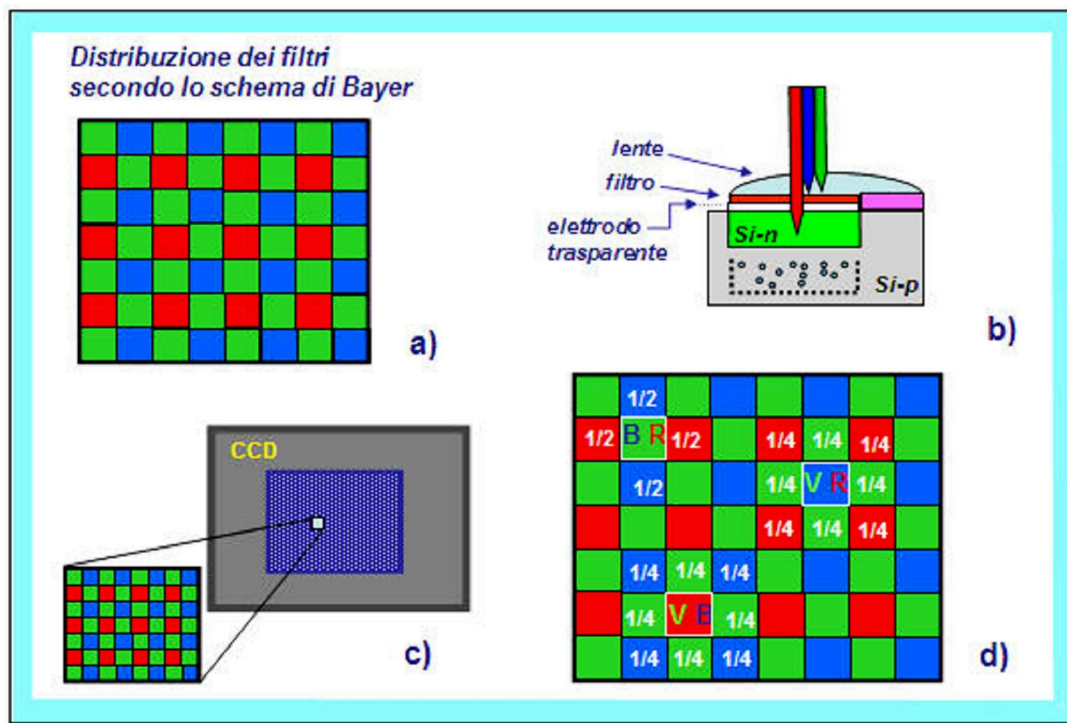


Figura 18 - La disposizione dei filtri cromatici secondo lo schema di Bayer (Galetto, 2006)

La disposizione più usata dei filtri sui fotoni è quella che segue lo schema di Bayer, in quale prevede che il 50% dei *pixel* riceva la luce verde, il 25% la luce rossa e il 25% la luce blu. Nella Figura 18 a) è indicata la disposizione dei filtri; in b) è indicata la posizione del filtro nel *pixel*; in c) e d) viene mostrato come tutta la maglia dei *pixel* del sensore sia coperta dai filtri secondo lo schema di Bayer.

Questa distribuzione in percentuali diverse dei filtri dei colori deriva dal fatto che l'occhio umano percepisce il verde come colore predominante per la definizione della nitidezza di

un'immagine. Inoltre nelle camere fotografiche digitali terrestri con CCD di formato rettangolare, che possono generare inquadrature con il lato lungo del CCD longitudinale o trasversale, lo schema di Bayer produce lo stesso tipo di immagine indipendentemente dalla modalità di ripresa, sia essa longitudinale o trasversale.

In fase di *post processing* si dovranno derivare, applicando gli algoritmi del caso, per ogni *pixel* le due componenti di colore che non sono state registrate dal fotodiodo di quel *pixel*, in funzione dei valori dei due colori mancanti registrati dai *pixel* adiacenti, mediante tecniche di interpolazione più o meno raffinate.

In molti casi i fotodiodi impiegati nei sensori sono sensibili anche alla parte dello spettro delle onde elettromagnetiche dell'infrarosso vicino, da 0,7 a 0,8 μm (IR); se si vogliono effettuare riprese a colori, ognuno dei tre filtri dovrà schermare oltre a due bande del visibile anche quella dell'IR. Se invece si vogliono effettuare riprese all'IR falso colore si sostituisce, nello schema di Bayer, il filtro B con un filtro che fa passare solo l'IR.

IV.1.1.2 Il principio di funzionamento di una camera digitale

Il principio di funzionamento di una camera digitale è riassunto nella Figura 19. Si supponga di procedere per ora con un sensore a toni di grigio.

Come in una camera tradizionale, l'oggetto forma un'immagine luminosa sul piano del fotogramma mediante l'obiettivo. Tale immagine risulta, in prima approssimazione una proiezione centrale dell'oggetto stesso, a meno degli effetti di distorsione delle ottiche utilizzate.

L'energia luminosa entra dall'obiettivo per un certo tempo (tempo di apertura del diaframma) che con i sensori digitali prende il nome di tempo di integrazione: in questo periodo, i fotodiodi del sensore si caricano ovvero accumulano una quantità di carica proporzionale all'energia luminosa che li colpisce.

Al termine del tempo di integrazione, occorre leggere l'intensità di carica accumulata da ciascun *pixel*. Questa operazione si attua facendo scorrere l'immagine verso il basso di una riga, trasferendo la carica da un *pixel* verso quello adiacente posto più in basso. La riga più bassa dell'immagine viene scritta nel registro di scorrimento che produce un segnale di tensione legato alla quantità di carica accumulata.

Un convertitore Analogico/Digitale (*A/D converter*) legge il segnale, lo campiona (discretizzazione) e lo traduce in numero binario espresso mediante un certo numero n di bit (quantizzazione, con 2^n livelli di intensità): tale valore sarà proporzionale alla quantità di luce che ha colpito il fotodiodo corrispondente. Per esempio, con 8 bit, il segnale verrà espresso con valori compresi tra 0 (corrispondente alla completa assenza di luce) e 255 (2^8-1 , corrispondente al bianco).

I valori quantizzati sono memorizzati in memoria all'interno della riga più bassa della matrice contenente l'immagine digitale corrispondente.

Il processo viene svolto per tutte le righe in sequenza facendo via via scorrere verso il basso tutte le righe presenti e compilando via via le righe corrispondenti della matrice immagine digitale.

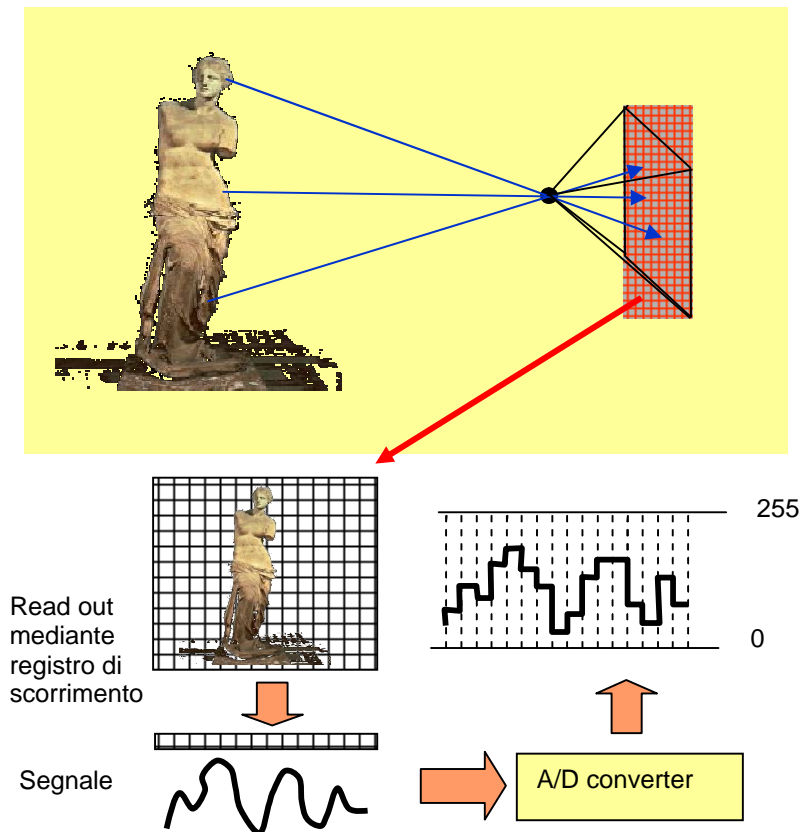


Figura 19 - Il funzionamento di una camera digitale

IV.1.1.3 Le camere fotogrammetriche digitali per piattaforma aerea

Un processo fotogrammetrico interamente digitale ha numerosi vantaggi sia economici che pratici. L'eliminazione delle problematiche di gestione delle pellicole, la loro archiviazione in ambiente controllato, la duplicazione e l'acquisizione indiretta in formato digitale riducono i tempi di produzione del dato primario e l'utilizzo di materiali costosi. I sensori digitali possono catturare con ampio *range* dinamico le scene fotografate, permettendo di acquisire dati anche in situazioni di illuminazione non ottimali, come ombre o riflessi. In aggiunta numerosi sensori hanno la capacità di registrare sia informazioni nel visibile o cromatiche (RGB) sia nell'infrarosso vicino (*Near InfraRed* = NIR), incrementando le possibili applicazioni delle immagini digitali. Il principale ostacolo dell'utilizzo di sensori digitali montati su piattaforma aerea finora è stata l'impossibilità di costruire un sensore efficace con numero di *pixel* sufficiente in termini di copertura e risoluzione per le applicazioni cartografiche. Le innovazioni nella tecnologia opto-elettronica rendono oggi possibile la produzione di sensori aerei di grande formato.

Anche se la tecnologia attuale permette la produzione di sensori areali di 4Kx4K *pixel* fino a 9Kx9K, questi sensori non hanno un numero sufficiente di *pixel* per applicazioni cartografiche. Si utilizzano allora due differenti approcci progettuali:

- Sensori areali multipli mosaicati;
- Sensori lineari *pushbroom*.

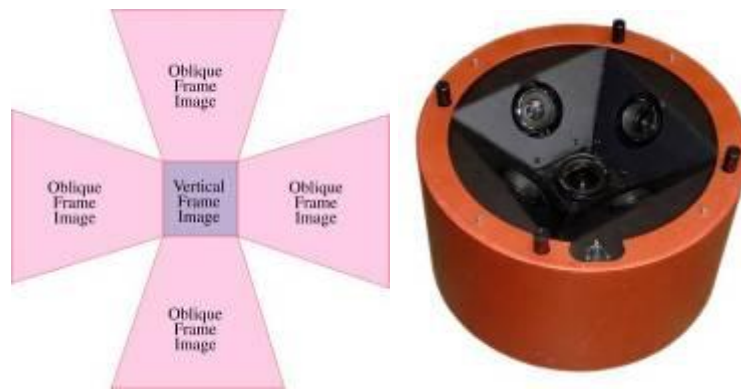


Figura 20 - Esempio di camera multi sensore

La soluzione che adotta sensori areali multipli usa un numero di *array* con un certo campo di sovrapposizione mosaicati in modo da generare un'immagine combinata equivalente a una singola immagine acquisita con sensore molto più grande (*digital frame image*). Gli esempi che verranno descritti nel seguito sono:

- DMC (*Digital Modular Camera*) di Z/I;
- Ultracam D e X di Microsoft Vexcel;
- DiMAC (*Digital Modular Aerial Camera*) di DiMAC System;
- DSS (*Digital Sensor System*) 422 e 439 di Applanix.

Le camere digitali aeree *pushbroom* permettono l'acquisizione di coperture stereoscopiche lungo la strisciata (*along-track*) sia nel visibile (RGB) che multi-spettrali. Come si può notare in Figura 21, sono presenti 3 o più sensori lineari (a seconda del tipo di camera) che permettono diverse combinazioni stereoscopiche, pancromatiche, RGB o NIR. L'utilizzo delle immagini *pushbroom* richiede modelli di sensore particolari, *software* specifici opportunamente adattati e informazioni continue di georeferenziazione diretta (GNSS/IMU). I modelli descritti nel seguito sono i seguenti:

- ADS 40 (*Aerial Digital Scanner*, I e II generazione) e ADS 80 di Leica Geosystem;
- 3-DAS-1 e 3DAS-2 (*Digital Aerial Scanner*) di Wehrli & Associates/Geosystem;
- JAS 150 di Jena Optronik AG.

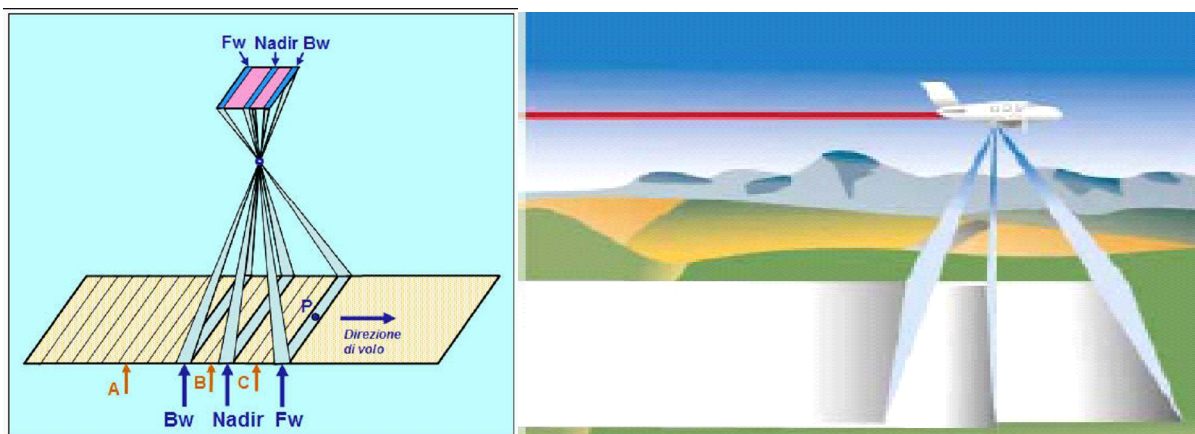


Figura 21 . Il funzionamento di camere digitali pushbroom

IV.1.2 CAMERE FRAME

IV.1.2.1 DMC (Digital Mapping Camera) di Z/I

<http://www.intergraph.com/photo/ia.aspx>

La camera DMC della *Z/I imaging* è composta da un corpo esterno che contiene rigidamente assemblati due gruppi di obiettivi: un gruppo di quattro obiettivi posti in posizione centrale (vedi Figura 22) aventi focale di 120 mm; ciascuno di questi proietta l'immagine del terreno su un proprio CCD Philips avente un sensore di 4096 x 7168 *pixel* con lato del *pixel* di 12 μ m.

Questi quattro coni sono montati nella camera in modo che gli assi ottici degli obiettivi siano leggermente convergenti in modo da creare una zona di sovrapposizione tra le quattro parti di territorio riprese da ciascuno di essi. Un *software* di *post-processing* ricompone le quattro immagini riprese dai quattro sensori e forma un'immagine virtuale le cui dimensioni sono di 13824 x 7680 *pixel*. Questa immagine è quella destinata ad essere impiegata per scopi fotogrammetrici. L'acquisizione dei toni di grigio avviene con una profondità di 12 bit.

In posizione esterna a questo corpo centrale di quattro coni (vedi Figura 23) sono montati altri quattro coni con obiettivi di focale molto più corta degli altri quattro, pari a 28 mm. Ciascuno di essi proietta l'immagine del terreno su un CCD con sensore di 2000 x 3000 *pixel*; questi quattro coni forniscono immagini multispettrali del terreno nelle quattro bande RGB e IR, con informazione radiometrica di 12 bit per *pixel*. Stante la corta focale di questi coni, il campo abbracciato da ciascuno di essi, sia nella direzione di volo che trasversalmente ad essa, risulta maggiore di quello complessivo dei quattro coni che registrano le immagini pancromatiche.



Figura 22 - La camera DMC di Z/I

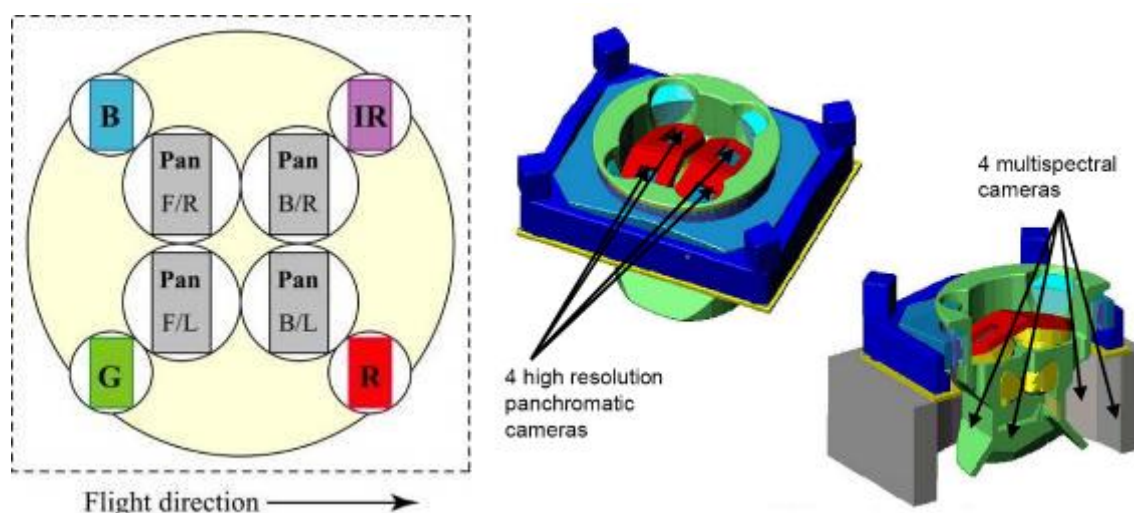


Figura 23 . La disposizione degli 8 sensori

Le immagini finali ad alta risoluzione a colori e NIR sono ottenute mediante *pan-sharpening*, fondendo le informazioni pancromatiche ad alta risoluzione con le informazioni multi spettrali a bassa risoluzione. Il risultato è un'immagine digitale virtuale di 13824 x 7680 *pixel* (lungo la strisciata), ottenuta con focale fittizia di 120 mm, a cui sono state corrette tutte le distorsioni di calibrazione.

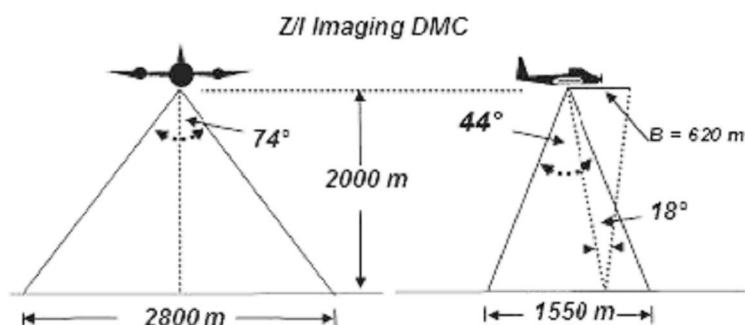


Figura 24 . La geometria dell'immagine della DMC

H [m]	Sm (1:)	GSD [m]	LT [m]	LL [m]	B (40 %LL) [m]
500	4167	0,05	691	384	154
1000	8333	0,10	1382	768	307
2000	16667	0,20	2765	1536	614
3000	25000	0,30	4147	2304	922
4000	33333	0,40	5530	3072	1229
5000	41667	0,50	6912	3840	1536
6000	50000	0,60	8294	4608	1843

Tabella 20 - Variazione dei parametri geometrici della presa con la camera DMC al variare della quota relativa di volo

Nella Figura 24 vengono schematizzate le caratteristiche geometriche di presa della DMC: il campo abbracciato trasversalmente alla direzione di volo è quasi uguale, mentre nella direzione di volo è sensibilmente minore, con una conseguente riduzione della base di presa

e quindi dell'angolo di osservazione stereoscopica. In Tabella 20, è possibile osservare la variazione dei parametri geometrici della presa in varie situazioni operative al variare della quota relativa di volo.

La camera DMC è dotata di dispositivo di correzione dell'effetto di trascinamento dell'immagine sul piano focale durante il tempo di integrazione del sensore (FMC) mediante TDI (Time Delay and Integration). Tale sistema consiste nel far scorrere le cariche da una riga del sensore matriciale alla successiva per la durata del tempo di integrazione richiesto dal sensore, con una velocità di scorrimento regolata in base alla velocità dell'aerea, al tempo di integrazione e all'altezza di volo.

Si noti che la stereoscopia è più che accettabile con un rapporto di base pari a circa 1/3.2.

IV.1.2.2 ULTRACAM di Vexcel Microsoft

<http://www.vexcel.com/>

Le camere di Vexcel sono caratterizzate dal modo con cui vengono acquisite le immagini e dall'utilizzo di numerosi sensori (9) con numero di *pixel* minore (più economici).



Figura 25. La camera UltraCAM D di Vexcel Microsoft

Il corpo della camera contiene otto coni: i quattro coni dedicati alla ripresa delle immagini parziali che formano via *software* l'immagine pancromatica virtuale, sono disposti in linea secondo la direzione di volo durante la presa (Figura 25). In posizione simmetrica all'asse su cui sono allineati questi quattro coni sono posizionati a coppia altri due coni che forniscono l'immagine multispettrale (RGB e IR). Gli obiettivi dei quattro coni che acquisiscono l'immagine pancromatica hanno focale di 100 mm; quelli dei coni che acquisiscono le immagini multispettrali hanno focale di 28 mm.

Nella camera UltraCAM-D, i CCD usati sia per l'acquisizione dell'immagine pancromatica virtuale che per le immagini multispettrali hanno sensori di 4008×2672 *pixel*, con *pixel* di lato di 9 μ m. Per ognuno dei quattro coni in linea l'immagine viene proiettata dall'obiettivo su un piano focale dove sono disposti i CCD.

Dei quattro coni uno è detto cono principale e il suo obiettivo proietta l'immagine del terreno su quattro CCD che sono disposti sul piano focale come indicato in Figura 26. Gli altri tre coni hanno la funzione di acquisire delle immagini che devono riempire i vuoti lasciati tra i quattro sensori del cono principale. Via *software* le 9 immagini acquisite vengono assemblate per formare l'immagine virtuale, che risulta di 11.500 x 7500 *pixel* con una focale virtuale di 101.4 mm.

L'esposizione dei 4 coni principali non avviene infatti contemporaneamente, ma in sequenza

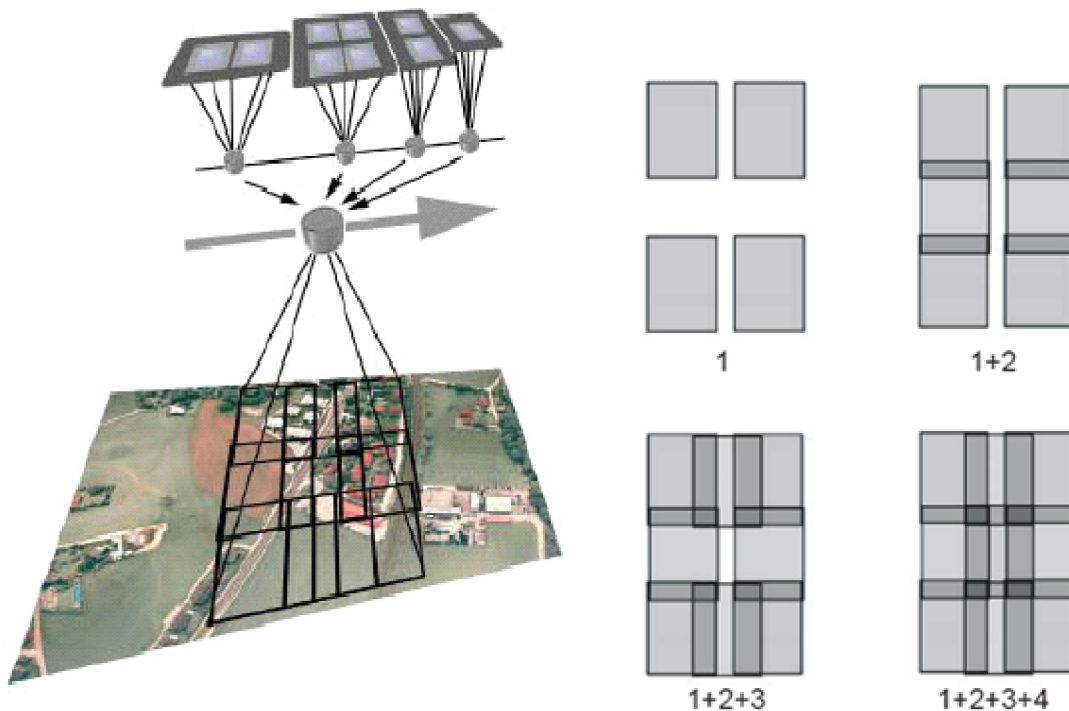


Figura 26 - Acquisizione e generazione dell'immagine virtuale delle camere UltraCAM

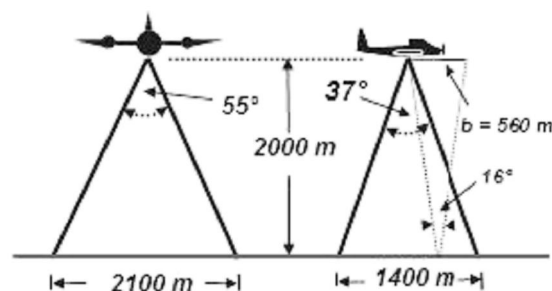


Figura 27 - La geometria dell'immagine di UltraCAM

(*syntopic*), ad un intervallo temporale che dipende dalla velocità dell'aereo, in modo che l'esposizione dei sensori di ciascun cono avvenga quando il centro dell'obiettivo di ciascun cono si trova sempre nella stessa posizione spaziale.

Le immagini RGB e pancromatiche vengono acquisite ad una risoluzione più bassa (1 sensore da 4008x2672 *pixel* per ogni componente) su tutto il campo di abbracciamento dell'immagine pancromatica. Le immagini ad alta risoluzione RGB e NIR sono generate

mediante operazioni di *pan-sharpening*. Tutte le componenti sono acquisite con almeno 12 bit di profondità spettrale.

Nella Figura 27 sono riassunte le caratteristiche geometriche di presa.

H [m]	Sm (1:)	GSD [m]	LT [m]	LL [m]	B (40 %LL) [m]
500	5000	0,05	518	338	135
1000	10000	0,09	1035	675	270
2000	20000	0,18	2070	1350	540
3000	30000	0,27	3105	2025	810
4000	40000	0,36	4140	2700	1080
5000	50000	0,45	5175	3375	1350
6000	60000	0,54	6210	4050	1620

Tabella 21 - Variazione dei parametri geometrici della presa con la camera UltraCAM-D al variare della quota relativa di volo

Il campo abbracciato trasversalmente alla direzione di volo è quasi uguale, mentre nella direzione di volo è sensibilmente minore, con una conseguente riduzione della base di presa e quindi dell'angolo di osservazione stereoscopica. In Tabella 21 è possibile osservare la variazione dei parametri geometrici della presa in varie situazioni operative al variare della quota relativa di volo. Si noti che la stereoscopia è più che accettabile con un rapporto di base pari a circa 1/3.7.

La camera UltraCAM . X è un aggiornamento della versione D da cui eredita le modalità di funzionamento. La versione X incrementa sostanzialmente la risoluzione utilizzando sensori da 7.2 m con 4992 x 3328 *pixel*, generando un'immagine virtuale di 14430 x 9420 *pixel*. In Tabella 22, è possibile osservare la variazione dei parametri geometrici della presa in varie situazioni operative al variare della quota relativa di volo.

H [m]	Sm (1:)	GSD [m]	LT [m]	LL [m]	B (40 %LL) [m]
500	5000	0,04	519	339	136
1000	10000	0,09	1035	675	270
2000	20000	0,18	2070	1350	540
3000	30000	0,27	3105	2025	810
4000	40000	0,36	4140	2700	1080
5000	50000	0,45	5175	3375	1350
6000	60000	0,54	6210	4050	1620

Tabella 22 - Variazione dei parametri geometrici della presa con la camera UltraCAM-X al variare della quota relativa di volo

Entrambi i modelli sono dotati di dispositivo di correzione dell'effetto di trascinamento dell'immagine sul piano focale durante il tempo di integrazione del sensore (FMC) mediante TDI. Tale sistema consiste nel far scorrere le cariche da una riga del sensore matriciale alla successiva per la durata del tempo di integrazione richiesto dal sensore, con una velocità di scorrimento regolata in base alla velocità dell'aereo, al tempo di integrazione e all'altezza di volo.

IV.1.2.3 DiMAC (Digital Modular Aerial Camera)

<http://www.dimacsystems.com/>

La camera DiMAC (*Digital Modular Aerial Camera*) è un sistema multicamera che si basa sull'impiego di una stessa camera, con un CCD matriciale, assemblata in più esemplari in un apposito contenitore.

Questo sistema si basa sull'impiego di un corpo cilindrico che può ospitare da una a quattro camere. La camera base (Figura 28 a sinistra) è costituita da una camera digitale con un sensore a matrice da 7216 x 5412 *pixel* e *pixel* da 6.8 μm . I fotodiodi sono caratterizzati da un ampio *range* dinamico (da 8 a 16 *bit*). La camera può essere dotata di obiettivi con diverse focali (55, 80, 100, 120 mm).

Nella Figura 28, a destra è rappresentato uno spaccato schematico della camera sezionata secondo un piano verticale mediano; il disegno mostra le due camere alloggiare in una metà del corpo cilindrico; altre due possono essere alloggiare nell'altra metà. Il corpo cilindrico alloggia al suo interno anche il dispositivo IMU per il *direct georeferencing*. L'acquisizione del colore avviene mediante sensore e CCD che adotta la disposizione di Bayer.

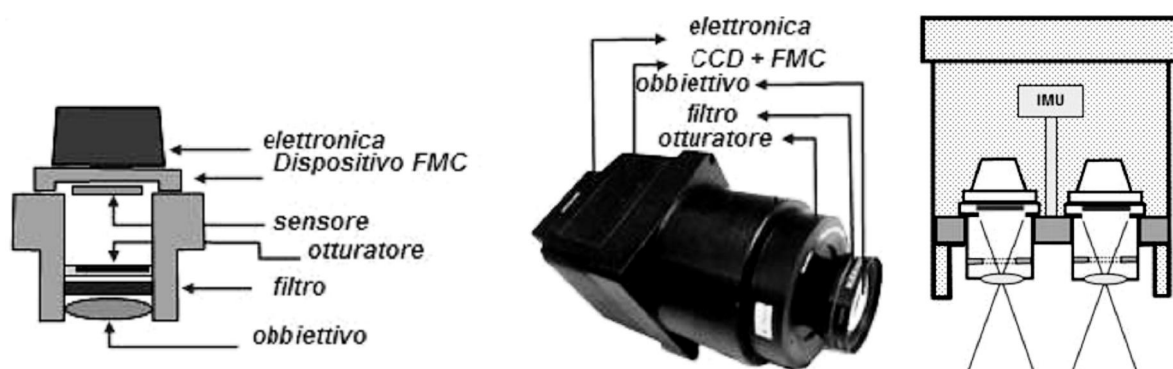


Figura 28 - La singola camera di base e il montaggio nel cilindro della camera composta

Come detto, le riprese possono essere effettuate con una o più camere sistemate nel corpo cilindrico; quando si usa più di una camera, un *software* opportuno ricompone in un'unica immagine virtuale le immagini che vengono acquisite dai sensori delle diverse camere.

Poiché i sensori sono rettangolari, utilizzando diverse combinazioni di camere e diverso orientamento dei sensori (cioè con il lato più lungo o con il lato più corto disposto nella direzione di volo) si possono ottenere molte diverse configurazioni di presa e conseguentemente molte diverse immagini virtuali ricomposte.

Per le riprese fotogrammetriche la DiMAC suggerisce la configurazione ad alta risoluzione formata da 2 camere con i sensori disposti in direzione perpendicolare alla direzione di volo (Figura 29), l'obiettivo con focale di 80 mm. In questo caso l'immagine virtuale che si ricava è di 10500x7200 *pixel*.

In Tabella 23, è possibile osservare la variazione dei parametri geometrici della presa per la composizione indicata in varie situazioni operative al variare della quota relativa di volo. Si noti che la stereoscopia è più che accettabile con un rapporto di base pari a circa 1/4.

Tutte le camere base sono dotate di dispositivo di correzione dell'effetto di trascinamento dell'immagine sul piano focale durante il tempo di integrazione del sensore (FMC) mediante

traslazione del sensore, come nelle camere analogiche (in cui si fa scorrere la pellicola). La velocità di scorrimento viene regolata in base alla velocità dell'aereo, al tempo di integrazione e all'altezza di volo.

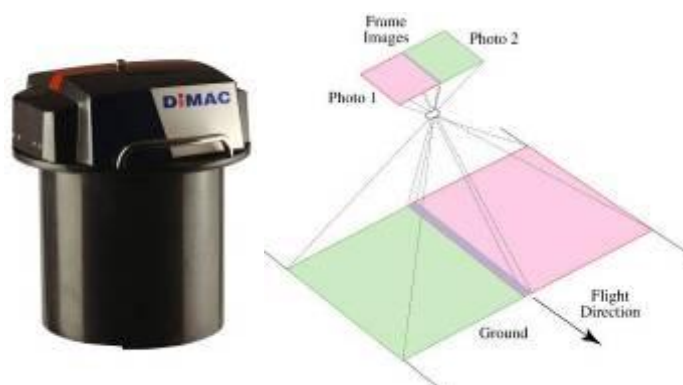


Figura 29 . Il corpo cilindrico in cui sono montate le camere e lo schema della soluzione con 2 camere montate

H [m]	Sm (1:)	GSD [m]	LT [m]	LL [m]	B (40 %LL) [m]
500	6250	0,04	446	306	122
1000	12500	0,09	893	612	245
2000	25000	0,17	1785	1224	490
3000	37500	0,26	2678	1836	734
4000	50000	0,34	3570	2448	979
5000	62500	0,43	4463	3060	1224
6000	75000	0,51	5355	3672	1469

Tabella 23 - Variazione dei parametri geometrici della presa con la camera UltraCAM-X al variare della quota relativa di volo

IV.1.2.4 Digital Sensor System (DSS) di Applanix

<http://www.applanix.com/>

L'Applanix ha recentemente messo sul mercato una camera digitale di medio formato a singolo sensore, denominata DSS (*Digital Sensor System*) nella versione 422 (Figura 30 - La camera digitale DSS e il sistema di acquisizione con POS AV integrato). Tale strumento si basa sull'uso di un sensore MegaVision di 5436 x 4092 (*along track*) pixel di 9 μ m di lato, in grado di acquisire immagini a colori e all'infrarosso, montato con obiettivo di focale di 40 mm o di 60 mm. Il sistema è dotato di sistema POS/AV per il *direct georeferencing*.

Una limitazione nell'uso di queste camere per riprese aeree consiste nel fatto che esse non sono dotate di alcun dispositivo di FMC e quindi deve essere sempre tenuto presente nel pianificare le riprese il rapporto tra velocità dell'aereo e il tempo di esposizione, per evitare l'effetto di trascinamento dell'immagine sul piano focale.

In Tabella 23 è possibile osservare la variazione dei parametri geometrici della presa per la composizione indicata in varie situazioni operative al variare della quota relativa di volo. Si noti che la stereoscopia è più che accettabile con un rapporto di base pari a circa 1/4.1.



Figura 30 - La camer digitale DSS e il sistema di acquisizione con POS AV integrato

H [m]	Sm (1:)	GSD [m]	LT [m]	LL [m]	B (40 %LL) [m]
500	8333	0,08	408	307	123
1000	12500	0,09	893	612	245
2000	25000	0,17	1785	1224	490
3000	37500	0,26	2678	1836	734
4000	50000	0,34	3570	2448	979
5000	62500	0,43	4463	3060	1224
6000	75000	0,51	5355	3672	1469

Tabella 24 - Variazione dei parametri geometrici della presa con la camera DSS 422 di Applanix al variare della quota relativa di volo

IV.1.3 CAMERE PUSH BROOM

IV.1.3.1 ADS 40 (I e II generazione) e ADS 80 di Leica Geosystems

<http://www.leica-geosystems.com/>

L'ADS40 è una camera *pushbroom* che integra al suo interno differenti sensori lineari nel visibile e nell'infrarosso vicino. Su un corpo cilindrico (Figura 31) che contiene l'ottica è montato il contenitore della parte elettronica che ospita i sensori disposti sul piano focale e l'unità di misura inerziale rigidamente fissata al piano focale.

L'ottica della camera è costituita da un sofisticato obiettivo telecentrico che ha la caratteristica di orientare ad angolo retto sul piano focale tutti i raggi uscenti da esso nello spazio immagine.

Sul piano focale della camera sono posizionati:

- tre gruppi di due sensori pancromatici che raccolgono le immagini *Forward* (Fw=avanti), *Nadir* (N, nadirale) e *Backward* (Bw, indietro);
- un gruppo di tre sensori pancromatici che raccolgono l'immagine RGB mediante un prisma tricroico;
- un sensore che raccoglie l'immagine nella banda IR.

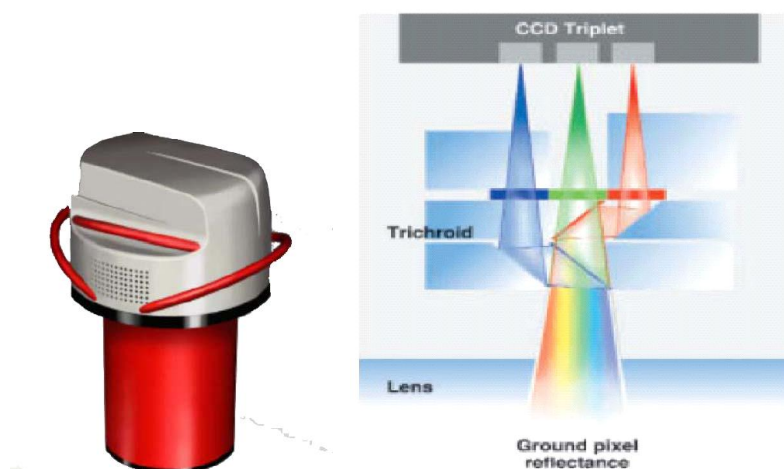


Figura 31 - L'ADS 40 di Leica Geosystems e il prisma tricromatico

I sensori sono costituiti da 12000 *pixel* di 6.5 μ m di lato.

L'immagine Fw, N e Bw viene raccolta non da tre sensori, ma, come detto, da tre coppie di sensori. Ciascuna coppia di sensori è costituita da due sensori accostati e sfalsati mezzo *pixel* (Figura 32, destra).

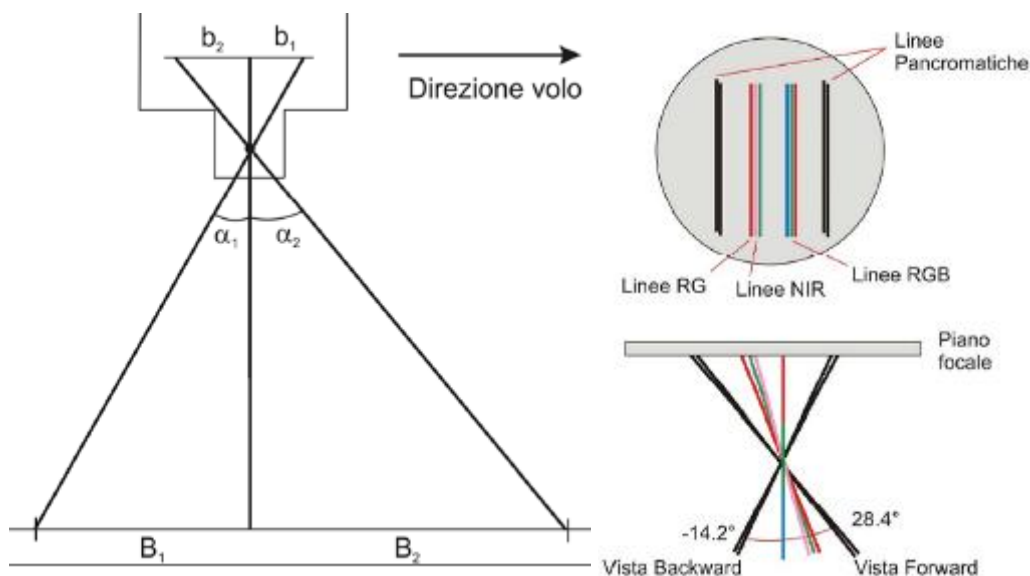


Figura 32 - Le tre linee di scansione e l'organizzazione dei sensori

Nella Figura 32, a destra, è indicata una delle possibili disposizioni dei sensori lineari sul piano focale della ADS 40; diciamo che è una delle possibili disposizioni poiché la tecnica con la quale la camera è realizzata consente di disporre i sensori in altre configurazioni. Ad esempio è possibile posizionare i sensori RGB in posizione intermedia tra due coppie di sensori pancromatici, oppure posizionare i sensori RGB in posizione Nadir spostando dalla posizione Nadir la coppia di sensori pancromatici.

Il sistema di separazione della luce incidente sui sensori che forniscono l'immagine a colori è basato sull'impiego di un filtro tricromatico (Figura 31); questo fa sì che, contrariamente a quelle

camere in cui vengono usati sensori trilineari normali, le immagini che si formano nelle tre componenti primarie della luce siano rigorosamente uguali. Le tre componenti RGB all'uscita dal prisma tricromatico passano attraverso un filtro a banda stretta in modo da effettuare una più accurata selezione delle tre componenti.

In Tabella 25 è possibile osservare la variazione dei parametri geometrici della presa per la composizione indicata in varie situazioni operative al variare della quota relativa di volo. L'abbracciamento longitudinale non viene più indicato in quanto è pari all'intera lunghezza della strisciata.

H [m]	Sm (1:)	GSD [m]	LT [m]
500	7966	0,05	621
1000	15931	0,10	1243
2000	31862	0,21	2485
3000	47794	0,31	3728
4000	63725	0,41	4971
5000	79656	0,52	6213
6000	95587	0,62	7456

Tabella 25 - Variazione dei parametri geometrici della presa con la camera ADS 40 . I generazione, al variare della quota relativa di volo

Le possibili visualizzazioni stereoscopiche sono:

- N-Bw con visualizzazione a colori (RGB per l'occhio sinistro in N, pancromatico per l'occhio destro Bw) e rapporto di base pari a 1/4;
- Fw-N con visualizzazione a colori (RGB per l'occhio destro in N, pancromatico per l'occhio sinistro Fw) e rapporto di base pari a 1/1.85;
- Bw-Fw con visualizzazione in pancromatico e rapporto di base pari a 1/1.26.



Figura 33 - La camera ADS 40 di II generazione

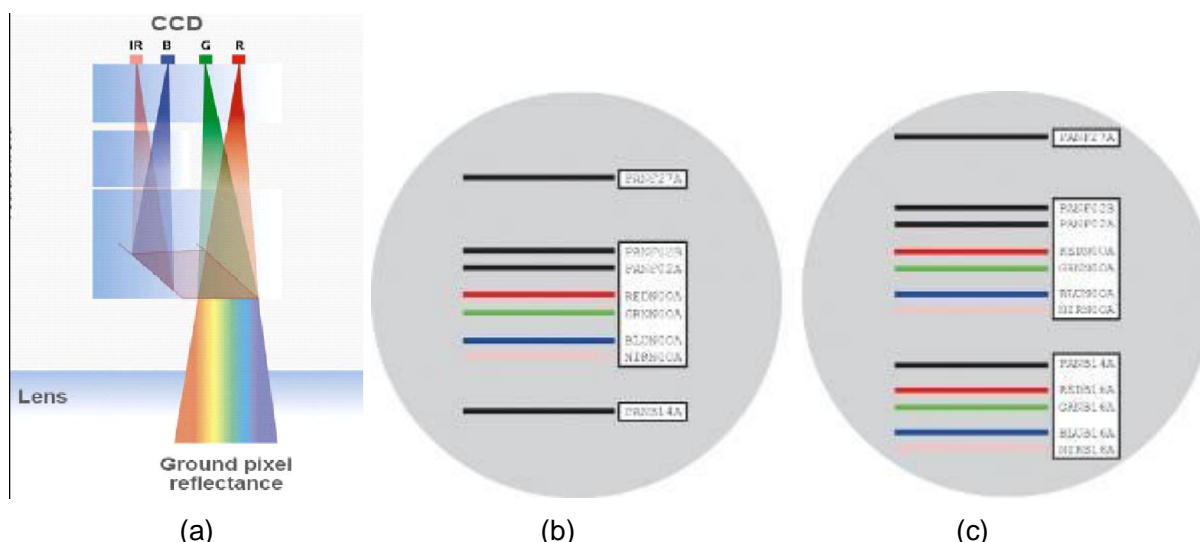


Figura 34 . Il quadricroide (a) e le versioni di sensori SH51 (b) e SH52 (c)

La seconda generazione dell'ADS 40 mantiene la stessa geometria della prima, ma utilizza un particolare prisma detto quadricroide (Figura 34a) per separare il segnale luminoso in 4 parti R,G,B e IR. La geometria delle direzioni acquisite è lievemente differente con 16° in Bw e 26 in Fw. La camera viene attrezzata di IMU di produzione non americana, per semplificare le procedure di acquisto.

È possibile a scelta montare due versioni della testa, contenenti i seguenti sensori:

- La versione SH51 (Figura 34b) simile a quella della prima generazione, con un solo quadricroide lungo la direzione N. In questo caso si hanno i canali RGB e NIR co-registrati ed è possibile osservare in stereoscopia anche con il canale NIR. Fw e Bw sono solamente pancromatici e il pancromatico centrale è lievemente inclinato (non è coregistrato con R, G, B, NIR);
- La SH52 (Figura 34c) utilizza due quadricroidi (N e Bw) con l'acquisizione di 2 immagini in 4 bande (R, G, B, NIR) e possibilità di stereoscopia effettiva N-Bw. In Fw c'è solamente il pancromatico.

IV.1.3.2 3-DAS-1 e 3-DAS-2 Werhli Associates/Geosystem

<http://www.wehrliassoc.com/>, <http://www.vingeo.com/das.html>

La camera 3-DAS-1 (Figura 35) è, come l'ADS 40 di Leica, una camera con 3 linee di scansione Bw, N e Fw. Per ciascuna linea di scansione monta un sensore trilineare di produzione Kodak con 8023 pixel di 9 µm e focale da circa 110 mm. Il range dinamico è pari a 14 bit. Non c'è la possibilità di acquisire dati NIR. Si integra con sistemi di georeferenziazione diretta GNSS/IMU.

In Tabella 26 è possibile osservare la variazione dei parametri geometrici della presa per la composizione indicata in varie situazioni operative al variare della quota relativa di volo. L'abbracciamento longitudinale non viene più indicato in quanto è pari all'intera lunghezza della strisciata.



Figura 35 - La camera digitale 3-DAS-1 di Wehrli & Associate e Geosystem

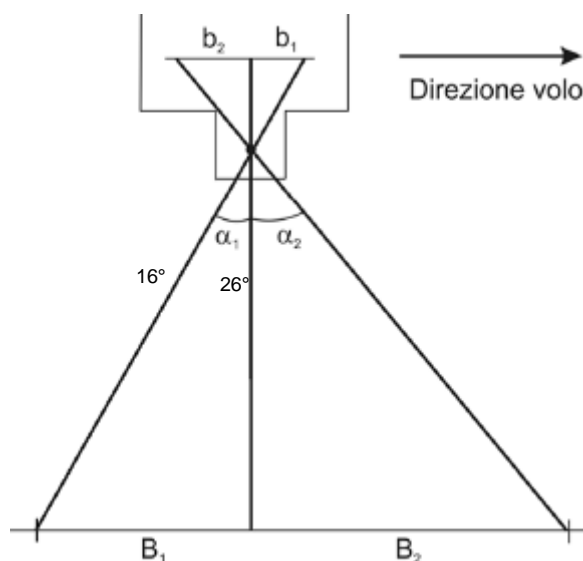


Figura 36 - La geometria di presa della camera 3-DAS-1

H [m]	Sm (1:)	GSD [m]	LT [m]
500	4545	0,04	328
1000	9091	0,08	656
2000	18182	0,16	1313
3000	27273	0,25	1969
4000	36364	0,33	2626
5000	45455	0,41	3282
6000	54545	0,49	3939

Tabella 26 - Variazione dei parametri geometrici della presa con la camera 3-DAS-1 al variare della quota relativa di volo

Le possibili visualizzazioni stereoscopiche sono tutte a colori:

- N-Bw rapporto di base pari a 1/3.5;
- Fw-N rapporto di base pari a 1/1.4;
- Bw-Fw rapporto di base pari a 1.

La camera 3-DAS-2 è una evoluzione della camera 3-DAS-1, di cui riporta la stessa organizzazione. I sensori trilineari RGB montati lungo le direzioni N, Fw e Bw dispongono di 15960 *pixel* da 9 μm con ottica da 123.2 mm di focale.

In Tabella 27 è possibile osservare la variazione dei parametri geometrici della presa per la composizione indicata in varie situazioni operative al variare della quota relativa di volo.

H [m]	Sm (1:)	GSD [m]	LT [m]
500	4058	0,04	583
1000	8117	0,07	1166
2000	16234	0,15	2332
3000	24351	0,22	3498
4000	32468	0,29	4664
5000	40584	0,37	5830
6000	48701	0,44	6995

Tabella 27 - Variazione dei parametri geometrici della presa con la camera 3-DAS-1 al variare della quota relativa di volo

IV.1.3.3 JAS 150s di Jena Optronics

<http://www.jena-optronik.com/cps/rde/xchg/optronik>

La camera JAS 150s di Jena Optronics (Figura 37a) è una camera *pushbroom* dotata di 9 linee di scansione da 12000 *pixel* di 6.5 μm . L'ottica ha 150 mm di focale e il *range* dinamico dei sensori è di 12 bit.

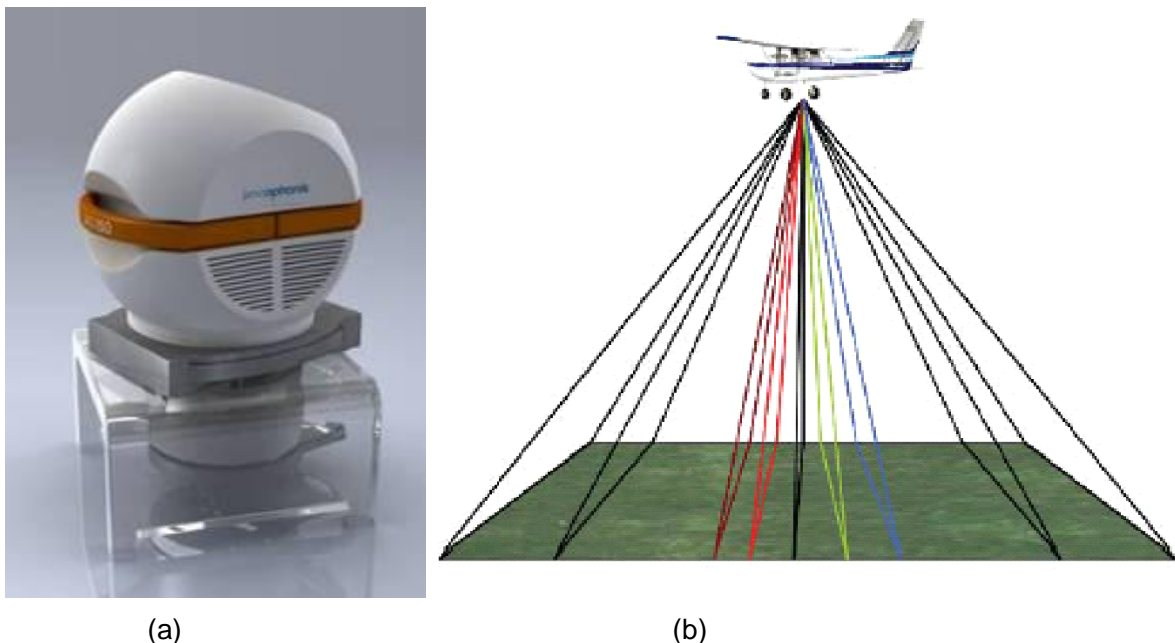


Figura 37 - La camera JAS 150s (a) e la geometria delle linee di scansione (b)

Si integra agevolmente con sistemi di georeferenziazione diretta GNSS/IMU di produzione Applanix, IGI o Leica.

La disposizione dei vari sensori non permette co-registrazione diretta. Infatti sono tutti disposti lungo direzioni differenti come visualizzato in Figura 37b:

- | | |
|----------------------|--------|
| 1. stereo Fw 2 (pan) | +20.5° |
| 2. stereo Fw 1 (pan) | +12.0° |
| 3. infrarosso | +4.6° |
| 4. rosso | +2.3° |
| 5. nadir (pan) | 0.0° |
| 6. verde | -2.3° |
| 7. blu | -4.6° |
| 8. stereo Bw 1 (pan) | -12.0° |
| 9. stereo Bw 2 (pan) | -20.5° |

In Tabella 28 è possibile osservare la variazione dei parametri geometrici della presa per la composizione indicata in varie situazioni operative al variare della quota relativa di volo. L'abbracciamento longitudinale non viene più indicato in quanto è pari all'intera lunghezza della strisciata.

Le possibili visualizzazioni stereoscopiche sono legate alle singole bande. Non essendoci co-registrazione tra le 3 bande cromatiche, non è possibile osservare le immagini a colori. È necessario generare prima l'ortofoto per poter associare coerentemente le bande RGB e NIR.

H [m]	Sm (1:)	GSD [m]	LT [m]
500	3333	0,02	260
1000	8117	0,07	1166
2000	16234	0,15	2332
3000	24351	0,22	3498
4000	32468	0,29	4664
5000	40584	0,37	5830
6000	48701	0,44	6995

Tabella 28 - Variazione dei parametri geometrici della presa con la camera JAS 150s al variare della quota relativa di volo

IV.1.4 CONCLUSIONI

L'intensa dinamica della ricerca e del mercato nel settore delle camere digitali fa prevedere che ai modelli descritti si sostituiranno a breve altri prodotti più efficienti ed economici, la cui illustrazione richiederà frequenti aggiornamenti del presente capitolo.

Si ritiene, tuttavia, che i principi generali di funzionamento e alcuni schemi realizzativi di base rimarranno attuali, nel prossimo futuro, per alcuni anni.

IV.2 SATELLITI ATTUALI E RELATIVI PRODOTTI DISPONIBILI

La crescente disponibilità di piattaforme satellitari a uso civile dotate di sensori ad alta risoluzione, dove con **alta risoluzione** si intende una risoluzione pari o inferiore a 1 m, fornisce alle amministrazioni uno strumento utile per rilevare e tenere sotto controllo porzioni di territorio.

Questa tecnologia può validamente sostituire le riprese aeree per la produzione di ortofoto digitali alla scala nominale 1:10.000, rivelandosi particolarmente adatta per monitoraggi ripetuti su periodi temporali anche brevi. Il tempo di riveduta sulla medesima area per questo tipo di satelliti risulta infatti essere molto basso (nell'ordine dei giorni) se paragonato ai tempi necessari per pianificare e ripetere un volo aerofotogrammetrico. I contenuti multi-spetttrali spesso disponibili utilizzando questo tipo di dato permettono di svolgere in modo più definito e preciso analisi ambientali e tematiche.

Il presente capitolo ha l'obiettivo di definire le caratteristiche delle piattaforme satellitari attualmente disponibili e i relativi prodotti che sono distribuiti commercialmente dalle aziende fornitrici.

IV.2.1 GEOEYE INC. (USA)

(<http://www.geoeye.com>)

IV.2.1.1 IKONOS

Data di lancio: 24 settembre 1999

Risoluzione: 1 m (pancromatico), 4 m (multispettrale)

<i>livello del prodotto</i>	<i>descrizione</i>	<i>CE90 [m]</i>
Geo ⁽¹⁾	georiferite e proiettate	/
Standard Ortho	ortorettificate senza punti di controllo	50 - 75
Reference ⁽²⁾	ortorettificate senza punti di controllo (angolo di presa 60-90°)	25.4
Pro	ortorettificate senza punti di controllo (angolo di presa 66-90°)	10.2
Precision ⁽¹⁾	ortorettificate con punti di controllo (angolo di presa 72-90°)	4.1
Precision Plus	ortorettificate con punti di controllo ad alta accuratezza	2.0

⁽¹⁾ non ortorettificate

⁽²⁾ possibilità di ordinare stereocopie

IV.2.1.2 Orbview-3

Data di lancio: 26 giugno 2003

Risoluzione: 1 m (pancromatico), 4 m (multispettrale)

livello del prodotto		descrizione	CE90 [m]
OrbView BASIC ⁽¹⁾ / OrbView GEO ⁽¹⁾ ⁽²⁾ ⁽³⁾	Express	radiometricamente e geometricamente corrette	60
	Enhanced	radiometricamente e geometricamente corrette, includono metadati di posizionamento	25
	1:50K	radiom. e geom. corrette, georiferite usando punti di legame su imm. multiple	25
	1:24K	radiom. e geom. corrette, georiferite usando GCP	12
OrbView ORTHO	1:50K	radiom. e geom. corrette, georiferite usando punti di legame su imm. multiple, proiettate e ortorettificate	25
	1:24K	radiom. e geom. corrette, georiferite usando GCP, proiettate e ortorettificate	12

⁽¹⁾ non ortorettificate

⁽³⁾ possibilità di ordinare stereocoppie

⁽²⁾ proiettate in un sistema cartografico locale

IV.2.1.3 GeoEye-1 (previsto)

Data di lancio prevista: 22 agosto 2008

Risoluzione attesa: 0.41 m (pancromatico), 1.65 m (multispettrale)

IV.2.2 DIGITAL GLOBE INC. (USA)

(<http://www.digitalglobe.com>)

IV.2.2.1 QuickBird

Data di lancio: 18 ottobre 2001

Risoluzione: 0.61 m (pancromatico), 2.44 m (multispettrale)

livello del prodotto	descrizione	CE90 [m]
BASIC ⁽¹⁾ ⁽²⁾	radiometricamente corrette	23 ⁽³⁾
STANDARD ⁽¹⁾ ⁽²⁾	radiometricamente e geometricamente corrette, georiferite e proiettate	23 ⁽³⁾
ORTHO ⁽²⁾ ⁽⁴⁾	radiom. e geom. corrette, georiferite, proiettate e ortorettificate	4.06

⁽¹⁾ non ortorettificate

⁽³⁾ escludendo le distorsioni legate al sensore, alla geometria di presa e al terreno

⁽²⁾ possibilità di ordinare stereocoppie

⁽⁴⁾ possibilità di ordinare prodotti a scala personalizzata

IV.2.2.2 WorldView-1

Data di lancio: 18 settembre 2007

Risoluzione: 0.50 m (pancromatico)

<i>livello del prodotto</i>	<i>descrizione</i>	<i>CE90 [m]</i>
BASIC ⁽¹⁾ ⁽²⁾	radiometricamente corrette	6.5 ⁽³⁾
STANDARD ⁽¹⁾ ⁽²⁾	radiometricamente e geometricamente corrette, georiferite e proiettate	6.5 ⁽³⁾
ORTHO ⁽²⁾ ⁽⁴⁾	radiom. e geom. corrette, georiferite, proiettate e ortorettificate	4.06

⁽¹⁾ non ortorettificate⁽³⁾ escludendo le distorsioni legate al sensore, alla geometria di presa e al terreno⁽²⁾ possibilità di ordinare stereocoppie⁽⁴⁾ possibilità di ordinare prodotti a scala personalizzata

IV.2.2.3 WorldView-2 (previsto)

Data di lancio prevista: novembre 2008

Risoluzione attesa: 0.46 m (pancromatico), 1.8 m (multispettrale)

IV.2.3 IMAGE SAT INTERNATIONAL N.V. (ISRAELE)

(<http://www.imagesatintl.com>)

IV.2.3.1 EROS-B

Data di lancio: 25 aprile 2006

Risoluzione: 0.7 m (pancromatico)

<i>livello del prodotto</i>	<i>descrizione</i>
Level 1A ⁽¹⁾ ⁽²⁾	solo radiometricamente corrette
Level 1B ⁽¹⁾ ⁽²⁾	radiometricamente e geometricamente corrette
Orthorectified	immagini ortorettificate disponibili su richiesta specifica

⁽¹⁾ non ortorettificate⁽²⁾ possibilità di ordinare stereocoppie

IV.2.3.2 EROS-C (previsto)

Data di lancio prevista: aprile 2008

Risoluzione: 0.7 m (pancromatico), 2.8 (multispettrale)

IV.2.4 NRSA (INDIA)

(<http://www.nrса.gov.in>)

IV.2.4.1 Cartosat-2

Data di lancio: 10 gennaio 2007

Risoluzione: 0.8 m (pancromatico)

<i>livello del prodotto</i>	<i>descrizione</i>	<i>CE90 [m]</i>
Level 1 ⁽¹⁾	solo radiometricamente corretta	136
Level 2 - Standard AOI ⁽¹⁾	radiometricamente e geometricamente corrette	136
Level 3A - Precision	radiom. e geom. corrette, georiferite, proiettate e ortorettificate	<10
Level 3B - High precision	radiom. e geom. corrette, georiferite, proiettate e ortorettificate (GCP e DEM forniti dall'utente)	<5

⁽¹⁾ non ortorettificate

IV.2.5 SPOT IMAGE S.A. (FRANCIA)

(<http://www.spotimage.fr>)

IV.2.5.1 KOMPSAT-2

Data di lancio: 28 luglio 2006

Risoluzione: 1 m (pancromatico), 4 m (multispettrale)

<i>livello del prodotto</i>	<i>descrizione</i>	<i>CE90 [m]</i>
Level 1A ⁽¹⁾	radiometricamente e geometricamente corrette	<80
Level 2A ⁽¹⁾	radiometricamente e geometricamente corrette, georiferite e proiettate	<80
Ortho	disponibile probabilmente da maggio	

⁽¹⁾ non ortorettificate

V TIPOLOGIE, GLOSSARIO, ACRONIMI

V.1 TIPOLOGIE DEI MODELLI ALTIMETRICI E CONTENUTI

V.1.1.1 DTM (*Digital Terrain Model*) o DEM (*Digital Elevation Model*)

In ambiente internazionale (e in questo testo), il termine DTM è sinonimo di DEM e indica un modello altimetrico riferito al solo terreno (non sono presenti alberi, edifici, ponti, viadotti e altre infrastrutture costruite dall'uomo). Esso è formato da:

- un insieme di punti quotati disposti in modo planimetricamente regolare secondo un grigliato a passo costante in coordinate cartografiche ($\Delta E, \Delta N$) o in coordinate geografiche ($\Delta \phi, \Delta \lambda$);
- *breakline* e punti quotati isolati di descrizione delle discontinuità del terreno.

In letteratura, il termine DEM viene anche utilizzato per indicare più in generale un modello altimetrico topografico e/o batimetrico in tutte le forme che può assumere, relativo al solo terreno.

V.1.1.2 DSM (*Digital Surface Model*)

Simile a DEM e DTM, il DSM è un modello altimetrico in cui viene descritta la superficie più alta di edifici, alberi, torri, ponti, viadotti e altri oggetti costruiti dall'uomo elevati rispetto al terreno. Esso è generalmente formato da:

- un insieme di punti quotati disposti in modo planimetricamente regolare secondo un grigliato a passo costante in coordinate cartografiche ($\Delta E, \Delta N$) o in coordinate geografiche ($\Delta \phi, \Delta \lambda$);
- *breakline* e punti quotati isolati di descrizione delle discontinuità della superficie più alta di alberi, edifici e degli altri oggetti costruiti dall'uomo disposti sul territorio in posizione elevata rispetto al terreno.

I DSM sono modelli necessari per molte applicazioni tra cui progetto e gestione di reti di telecomunicazioni *wireless*, studi di inquinamento dell'aria, gestione forestale, modellazione 3D e simili.

V.1.1.3 DDTM (*Dense Digital Terrain Model*) o DDEM (*Dense Digital Elevation Model*)

Come il DTM, con passo del grigliato più fitto in modo da non richiedere la presenza di elementi vettoriali aggiuntivi (*breakline* o punti quotati isolati). Il passo della griglia è dello stesso ordine di grandezza della tolleranza planimetrica del modello. In questo testo DDTM è sinonimo di DDEM.

V.1.1.4 DDSM (*Dense Digital Surface Model*)

Come il DSM, con passo del grigliato più fitto in modo da non richiedere la presenza di elementi vettoriali aggiuntivi (*breakline* o punti quotati isolati). Il passo della griglia è dello stesso ordine di grandezza della tolleranza planimetrica del modello.

V.1.1.5 TIN (*Triangulated Irregular Network*)

Un TIN è un modello altimetrico formato da un insieme di triangoli adiacenti e non sovrapposti, determinato a partire da un insieme di punti quotati disposti planimetricamente in modo irregolare. La struttura di un TIN memorizza:

- i punti quotati disposti irregolarmente;
- le linee di descrizione dei lati dei triangoli;
- i poligoni di rappresentazione dei triangoli interpretati come *breakline*;
- le relazioni topologiche tra triangoli adiacenti.

Un modello altimetrico di tipo TIN deve essere generato in modo che i lati dei triangoli non attraversino le *breakline* presenti sul territorio, ma le descrivano mediante i propri lati. Perciò un TIN è preferibile a un modello regolare (DEM) quando sono presenti sul territorio linee di discontinuità molto frequenti, che richiederebbero una descrizione vettoriale particolarmente onerosa.

I triangoli che compongono i TIN vengono generalmente definiti, a partire da un insieme di punti quotati, per mezzo della triangolazione di Delaunay, basata sul criterio: considerato il cerchio circoscritto a ogni elemento triangolare, nessun altro nodo oltre a quelli dell'elemento in esame deve cader e al suo interno.

V.2 TIPOLOGIE DI ORTOFOTO

V.2.1 IN FUNZIONE DELL'UTILIZZO

Sulla base delle principali caratteristiche di impiego delle ortofoto digitali in scala 1:10.000, sono stati identificati 2 macro-raggruppamenti a cui ricondurre la definizione dei parametri di standardizzazione del prodotto.

- *tipologia A*: produzione di ortofoto orientate ad applicazioni prevalentemente cartografiche. Seguono le regole di una rappresentazione cartografica (precisioni, contenuto, tagli o in fogli, ecc);
- *tipologia B*: produzione di ortofoto per applicazioni prevalentemente tematiche e di comparazione con carte tecniche. Le regole che ne caratterizzano la precisione, il contenuto ecc. sono generalmente meno restrittive e, in genere, possono essere definite di volta in volta, in funzione dell'applicazione.

V.2.2 IN FUNZIONE DEL CONTENUTO

In base al contenuto radiometrico dell'ortofoto digitale è possibile definire le tipologie seguenti.

V.2.2.1 B/N o pancromatico

Il contenuto di ogni *pixel* dell'ortofoto digitale è costituito da un valore di grigio che esprime l'intensità radiometrica (luminosa) della porzione di superficie terrestre rappresentata (Figura 38a). L'intensità luminosa viene generalmente espressa mediante un numero intero da n bit e pertanto compreso tra 0 (il nero) e $2^n - 1$ (il bianco). Nel caso più comune si usano 8 bit e quindi i valori di luminosità varieranno tra 0 (il nero) e 255 (il bianco).

V.2.2.2 A colori (RGB, True color)

Il contenuto di ogni *pixel* dell'ortofoto digitale è costituito da 3 valori che esprimono l'intensità radiometrica (luminosa) delle 3 componenti cromatiche principali nel campo del visibile (rosso, verde e blu, Red Green Blue, RGB) della porzione di superficie terrestre rappresentata (Figura 38b). L'intensità luminosa di ciascuna componente cromatica viene generalmente espressa mediante un numero intero da n bit e pertanto compreso tra 0 (il nero) e $2^n - 1$ (il bianco). Nel caso più comune si usano 8 bit per componente cromatica ($3 \times 8 = 24$ bit) e quindi i valori radiometrici di ogni componente cromatica varieranno tra 0 (assenza di questo colore) e 255 (colore saturo).

V.2.2.3 Falso colore

Il contenuto di ogni *pixel* dell'ortofoto digitale è costituito da 3 valori che esprimono l'intensità radiometrica di 3 bande limitate a un ben definito intervallo di frequenza (visibile rosso, verde e/o blu, infrarosso vicino, medio e/o termico, ultravioletto ecc.) della porzione di superficie terrestre rappresentata. Tali valori vengono visualizzati come 3 componenti cromatiche principali RGB (Figura 38c) e valgono pertanto le regole descritte per le ortofoto a colori..

V.2.2.4 Multispettrale, Iperspettrale

Il contenuto di ogni *pixel* dell'ortofoto digitale è costituito da m valori che esprimono l'intensità radiometrica di m bande limitate a un ben definito intervallo di frequenza (visibile rosso, verde e blu, infrarosso vicino, medio e termico, ultravioletto ecc.) della porzione di superficie terrestre rappresentata. Per esempio un'ortofoto a colori è un'ortofoto multi spettrale con 3 bande corrispondenti al rosso, al verde e al blu nel campo del visibile. L'intensità di ciascuna componente cromatica viene generalmente espressa mediante un numero intero da n bit e pertanto compreso tra 0 (assenza di segnale per la banda corrispondente) e $2^n - 1$ (banda satura). Nel caso più comune si usano 8 bit per componente cromatica ($m \cdot 8$ bit) e quindi i valori radiometrica di ogni componente cromatica varieranno tra 0 (assenza di questa banda) e 255 (banda satura). La differenza tra i termini multispettrale e iperspettrale è semplicemente legato al numero m di bande: se m è relativamente piccolo ($m < 10$) si usa il termine multi spettrale, in caso contrario iperspettrale.

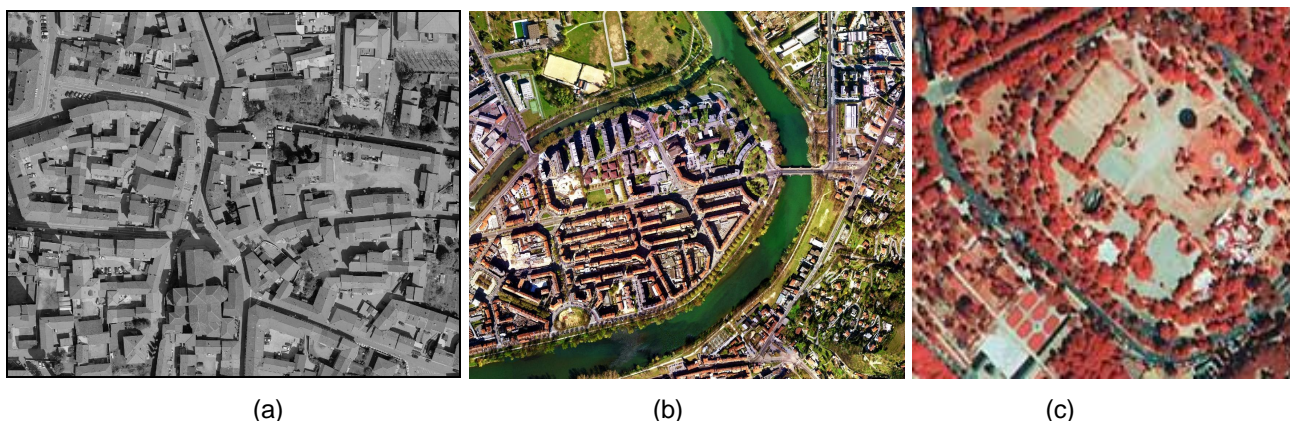


Figura 38 - Un esempio di ortofoto (a) B/N, (b) a colori, (c) in falso colore

V.2.3 IN FUNZIONE DELLA PRECISIONE

Come le tutti i dati di tipo cartografico anche le ortofoto seguono un insieme di regole standardizzate che ne definiscono le precisioni e i contenuti. In funzione della precisione si definiscono le 3 tipologie seguenti.

V.2.3.1 Speditiva

Un'ortofoto speditiva è una rappresentazione fotografica del territorio avente caratteristiche di precisione più scarse rispetto alle ortofoto ordinarie. Viene generalmente prodotta con tecniche:

- più rapide, per applicazioni in cui è importante la generazione di un dato cartografico in tempi stretti, come per esempio nella gestione delle emergenze ambientali;
- e/o più economiche, per applicazioni ambientali e tematiche, in cui la possibilità di svolgere operazioni di foto-interpretazione e analisi visive approfondite risulta più importante rispetto al rigore metrico.

In genere, essa viene caratterizzata con una precisione grafica corrispondente a circa 0.3 mm alla scala nominale dell'ortofoto per gli elementi posti sul terreno e pari a circa 0.9 mm alla scala nominale dell'ortofoto per gli oggetti o le parti di oggetti (edifici, strade, ponti, viadotti, alberi, ò) che sono in elevazione rispetto al terreno.

Infatti, in una ortofoto speditiva vengono corrette in modo sostanzialmente fedele solamente le deformazioni prospettiche presenti sui fotogrammi relative al terreno. Quelle legate agli oggetti elevati non sono mai eliminate completamente.

V.2.3.2 Ordinaria

Un'ortofoto ordinaria è una rappresentazione fotografica del territorio che segue le norme di precisione legate alle rappresentazioni cartografiche.

In genere, essa viene caratterizzata con una precisione grafica corrispondente a circa 0.2 mm alla scala nominale dell'ortofoto per gli elementi posti sul terreno e pari a circa 0.6 mm alla scala nominale dell'ortofoto per gli oggetti o le parti di oggetti (edifici, strade, ponti, viadotti, alberi, \tilde{o}) che sono in elevazione rispetto al terreno.

Infatti, in una ortofoto ordinaria vengono corrette in modo metricamente rigoroso solamente le deformazioni prospettiche presenti sui fotogrammi relative al terreno. Quelle legate agli oggetti elevati rispetto al terreno vengono in genere limitate, ma mai eliminate completamente. Non esiste pertanto una corretta sovrapposizione tra alcune entità contenute in cartografia (edifici, ponti, \tilde{o}) e la relativa immagine presente nell'ortofoto.

V.2.3.3 Di precisione

Un'ortofoto di precisione è una rappresentazione fotografica del territorio in cui vengono corrette, in modo metricamente rigoroso, tutte le deformazioni prospettiche presenti sui fotogrammi legate al terreno, agli edifici e alle infrastrutture (ponti, viadotti, \tilde{o}).

Essa viene caratterizzata con una precisione grafica corrispondente a circa 0.2 mm alla scala nominale dell'ortofoto per gli elementi posti sul terreno e pari a circa 0.6 mm alla scala nominale dell'ortofoto per gli oggetti o le parti di oggetti (edifici, strade, ponti, viadotti, alberi, \tilde{o}) che sono in elevazione rispetto al terreno.

Una ortofoto di precisione è sovrapponibile (nei limiti di precisione specificati) con una cartografia numerica relativa alla stessa zona ed eseguita alla stessa scala nominale: esiste una corretta sovrapposizione tra tutte le entità (edifici, strade, ponti, \tilde{o}) contenute in cartografia e la relativa immagine presente nell'ortofoto.

V.3 TERMINOLOGIA

V.3.1.1 Altezza ellissoidica, quota ortometrica e ondulazione del geoide

L'altezza ellissoidica h (detta anche quota ellissoidica) si definisce, generalmente, come la distanza tra un punto e la superficie di riferimento ellissoidica (*datum*) misurata lungo la normale all'ellissoide e considerata positiva al di fuori di esso.

La quota ortometrica H (detta anche semplicemente quota) è la distanza tra un punto e la superficie equipotenziale di riferimento (geoide) misurata lungo la verticale (normale al geoide) e considerata positiva al di fuori del geoide stesso. La quota ortometrica non è pertanto corrispondente alla lunghezza di un segmento rettilineo, ma corrisponde allo sviluppo della linea di forza del campo di gravità terrestre (involuppo delle verticali) compresa tra il punto considerato e la superficie del geoide.

Oltre a essere una un segmento (h) e l'altra una curva (H), come si nota in Figura 39, la direzione della normale all'ellissoide e la direzione della verticale non sono coincidenti e, nel punto considerato formano un angolo chiamato deviazione della verticale. Si può dimostrare che, in realtà, il valore di questo angolo, variabile da punto a punto, risulta molto piccolo (poche decine di secondi sessagesimali) per cui fra i valori delle due quote h e H vale la relazione:

$$h = H + N$$

dove si indica con N la distanza tra geoide ed ellissoide, misurata lungo la verticale e variabile da punto a punto, detta *ondulazione del geoide*.

Un modello di geoide (per esempio ITALGEO2005) è formato dall'insieme dei valori di ondulazione noti per tutta la zona che si vuole descrivere, in genere memorizzati in forma di grigliato a maglia con passo costante (in coordinate geografiche).

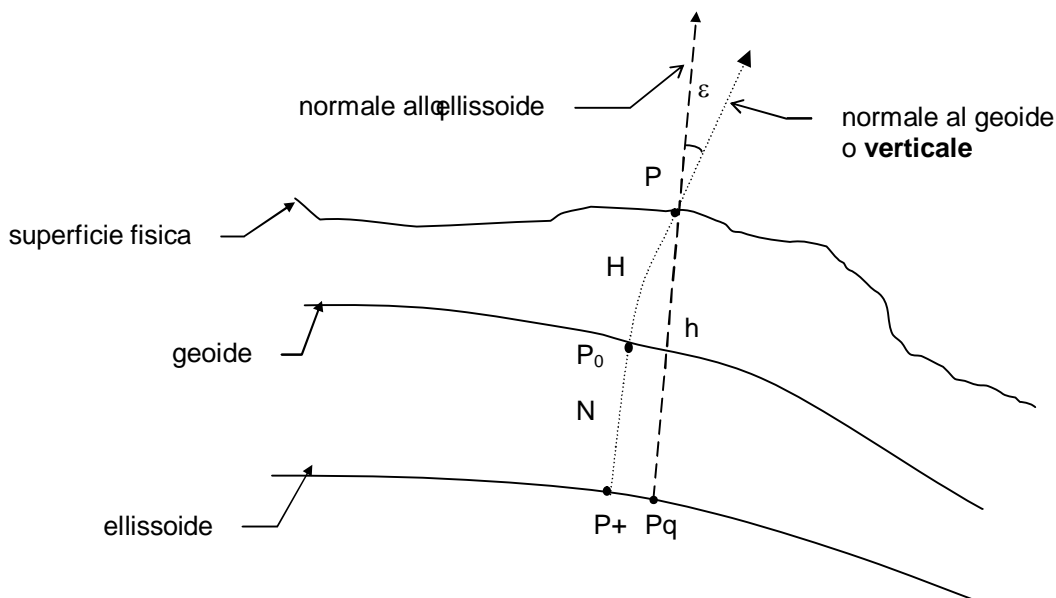


Figura 39 - Altezza ellissoidica, quota ortometrica e ondulazione del geoide

V.3.1.2 Interpolazione

Come utilizzata in questo documento, l'interpolazione è la stima di un valore di quota (Z) da associare a un punto di posizione planimetrica nota (x,y) ottenuta in base alle quote note dei punti quotati e degli elementi vicini estratti da un modello altimetrico. Ci possono essere diverse forme di interpolazione:

- Media ponderata con l'inverso delle distanze (*Inverse distance Weighted Interpolation*) è un metodo di interpolazione che, per determinare la quota di un nuovo punto incognito, usa una media ponderata dei valori di quota dei punti noti più vicini con peso pari ad una potenza (in genere 1, 2 o 3) dell'inverso della distanza;
- *Kriging*, un metodo di interpolazione che sfrutta tecniche geostatistiche pesando i valori vicini delle quote misurate contenute nel modello altimetrico in modo da derivare una predizione delle quote per ogni punto. I pesi non tengono conto solamente della distanza tra i punti misurati e la posizione da predire, ma anche dalle vari e correlazioni presenti tra i punti misurati. Con il *kriging*, i dati di partenza sono usati per definire un modello di correlazione spaziale, utile per determinare i pesi da associare ai punti noti vicini al punto da stimare, al fine di determinare una superficie locale interpolante statisticamente corretta;
- *Natural Neighbor Interpolation*, è un metodo per interpolare la quota di nuovi punti P utilizzando le quote dei punti noti per mezzo di uno schema di pesatura di tipo areale nell'intorno di P ;
- *Spline*, è un metodo per interpolare la quota di nuovi punti utilizzando relazioni analitiche che, minimizzando le curvature della superficie stessa, generano una superficie locale liscia passante per i punti noti.

V.3.1.3 Precisione, accuratezza e tolleranza

Accuratezza e precisione sono parametri spesso usati per indicare la qualità di una misura, una posizione o una coordinata. Una distinzione importante deve essere svolta tra accuratezza e precisione.

L'accuratezza è il grado di vicinanza di osservazioni di una grandezza rispetto al valore reale della grandezza. Viene considerata alta quando il valore stimato è molto vicino al valore teorico, bassa quando il valore stimato è distante dal valore vero.

Viene determinata mediante comparazione tra le osservazioni e il loro valore vero+ determinato con osservazioni dotate di accuratezza intrinseca molto più elevata. In questo modo, l'accuratezza si esprime mediante il valore *RMSE (Root Mean Square Error)* ovvero la radice quadrata della media di un insieme di differenze al quadrato tra l'insieme delle coordinate stimate e il valore corrispondente per gli stessi punti determinato con una sorgente indipendente avente un'accuratezza molto più alta. Le cause di bassa accuratezza sono spesso imputabili alla presenza, nelle osservazioni della grandezza, di errori sistematici e/o grossolani, che comportano una distorsione della media stimata. Essa definisce un indice di qualità oggettivo indipendente dalle osservazioni effettuate.

La precisione è il grado di vicinanza delle osservazioni di una grandezza rispetto alla loro media stimata. Viene considerata alta quando le osservazioni sono concentrate nell'intorno della media stimata, bassa quando le osservazioni sono distribuite intorno alla media stimata in modo molto più ampio. Può essere anche considerata un indice di consistenza sulla ripetizione delle misure, ovvero un indice di qualità interno in quanto legato alle stesse

misure della grandezza. L'indicatore della precisione più comunemente utilizzato è la deviazione standard o scarto quadratico medio (sqm) in genere indicato σ .

La Figura 40 illustra le varie relazioni tra questi due parametri: il valore vero della grandezza misurata è posto nell'intersezione della croce, l'area grigia indica l'inviluppo delle osservazioni della grandezza, il centro dell'area grigia corrisponde al valore stimato (misurato) della grandezza, il raggio dell'area grigia è una misura dell'incertezza della stima (precisione) riconducibile ad una funzione dello sqm.

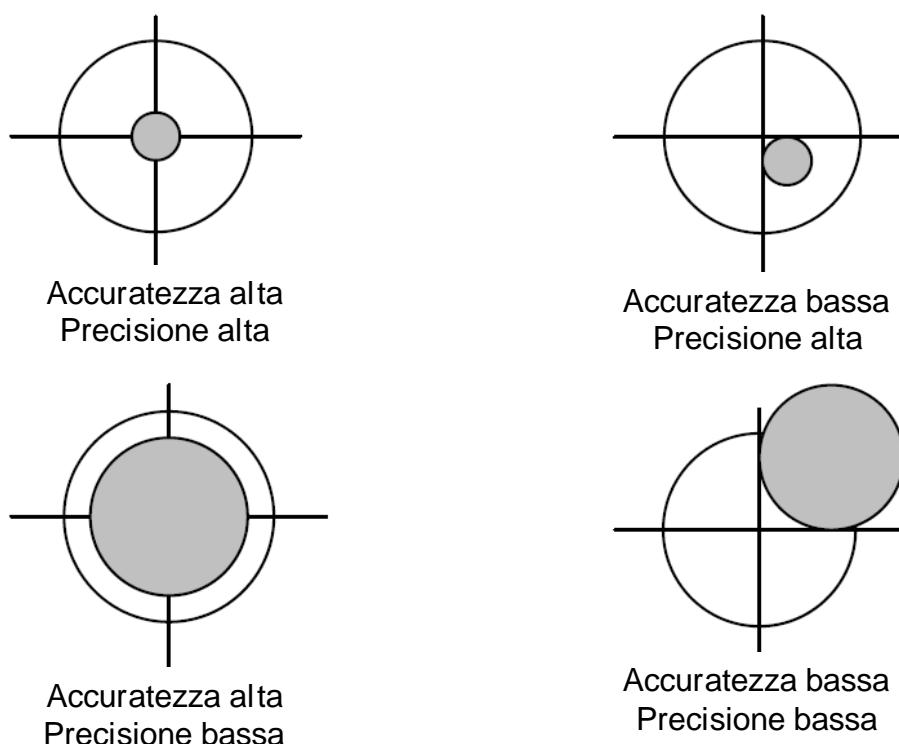


Figura 40 - Accuratezza e precisione

In assenza di errori grossolani e sistematici, l'accuratezza e la precisione coincidono.

Per individuare indici di qualità della posizione di elementi geometrici, è necessario riferirsi all'accuratezza (e non alla precisione).

Nel caso di una grandezza monodimensionale Z (per esempio la quota di un modello altimetrico) esprimibile come una variabile casuale continua, in genere descritta per mezzo di una distribuzione gaussiana, non è possibile esprimere la probabilità che un singolo valore possa essere uguale al valore vero. È invece possibile determinare la probabilità che il valore vero sia compreso in un certo intervallo chiamato intervallo di confidenza $[a,b]$: La probabilità P che il valore vero sia contenuto nell'intervallo di confidenza $[a,b]$ viene chiamato livello di significatività.

Con riferimento alla distribuzione di Gauss, è possibile determinare i limiti dell'intervallo di confidenza mediante un fattore u che moltiplica lo sqm σ :

$$P(z_v - u\sigma_z \leq \text{valore vero} \leq z_v + u\sigma_z) = P$$

come indicato nella Tabella 29. Il valore dei limiti dell'intervallo di confidenza con probabilità del 95 % prende il nome di LE95 (*Linear Error* al 95% di probabilità) e viene comunemente

utilizzato nelle normative internazionali come indice di qualità per l'accuratezza. In questo testo si utilizza come valore di tolleranza per variabili casuali monodimensionali z .

Probabilità	u	Indicatore di Qualità	Nome
68.3 %	1	σ_z	LE68.3
50%	0,6745	$0.6745 * \sigma_z$	LE50
90%	1.645	$1.645 * \sigma_z$	LE90
95%	1.960	$1.960 * \sigma_z$	LE95
99%	2.576	$2.576 * \sigma_z$	LE99

Tabella 29 . Indici di qualità per l'accuratezza di variabile monodimensionale z

Lo σ_z può essere determinato, in base al $RMSE$, nel caso di un campione di verifica numeroso, per cui:

$$LE95 = 1.960 \text{ } RMSE_z$$

Dove:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{m,i} - Z_{r,i})^2}{n}}$$

indicando con:

- n il numero delle osservazioni di riferimento;;
- $Z_{r,i}$ le osservazioni di riferimento ottenute in modo molto più accurato rispetto al dato da verificare;
- $Z_{m,i}$ le osservazioni direttamente misurate da verificare.

Il caso di una variabile casuale monodimensionale, può essere estesa alle due dimensioni in cui ogni osservazione è composta da due valori (X,Y) . Si parte dalle stesse assunzioni fatte per il caso monodimensionale.

Le osservazioni sono (X_{mi}, Y_{mi}) . L'equivalente dell'intervallo di confidenza monodimensionale è l'area di confidenza, che viene usualmente descritta mediante un cerchio attorno alla miglior stima del valore vero. La probabilità che il valore vero sia compreso in quest'area viene calcolato mediante integrazione della distribuzione di Gauss bivariata. Quest'area circolare viene caratterizzata attraverso il suo raggio r che viene utilizzato come un indice di qualità dell'accuratezza di un variabile casuale bidimensionale denominato CE (Circular Error):

$$P(r, \sigma_x, \sigma_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \iint_{(x-x_t)^2 + (y-y_t)^2 \leq r^2} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-x_t)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_t)^2}{\sigma_y^2} \right]} dx dy .$$

Per alcuni valori di probabilità P , il raggio r può essere calcolato in funzione delle deviazioni standard σ_x e σ_y (vedi Tabella 30).

Probabilità	Indicatore di qualità	Nome
39.4 %	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$	CE39.4
50 %	$\frac{1.1774}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$	CE50
90 %	$\frac{2.146}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$	CE90
95 %	$\frac{2.4477}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$	CE95
99.8 %	$\frac{3.51}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$	CE99.8

Tabella 30 - Indici di qualità per l'accuratezza bidimensionale

Il valore CE95 viene comunemente utilizzato nelle normative internazionali come indice di qualità per l'accuratezza di variabili bidimensionali. In questo testo si utilizza come valore di tolleranza per le variabili casuali bidimensionali.

Nel caso in cui l'errore sia distribuito normalmente e l'errore per la componente X sia indipendente e simile all'errore per la componente Y , il CE95 può essere determinato come:

$$CE95 = \frac{2.4477}{\sqrt{2}} RMSE_r = 1.7308 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{m,i} - X_{r,i})^2 + (Y_{m,i} - Y_{r,i})^2}{n}}$$

indicando con:

- n il numero delle osservazioni di riferimento;
- $X_{r,i}$ $Y_{r,i}$ le osservazioni di riferimento ottenute in modo molto più accurato rispetto al dato da verificare;
- $X_{m,i}$ $Y_{m,i}$ le osservazioni direttamente misurate da verificare.

V.3.1.4 Errori grossolani

In genere, gli errori che perturbano le misure di precisione seguono una distribuzione normale. Quando una osservazione non segue questa distribuzione viene detta errore grossolano. Tale errore deriva da varie cause, ma in genere ha uno scarto rispetto alla media maggiore, in valore assoluto, di 3σ (nel caso monodimensionale pari al 99.75% di probabilità per l'intervallo di confidenza associato).

Nella bibliografia, gli errori grossolani si suddividono in:

- *blunder* (o *gross error*) corrispondenti ad errori di grande entità molto differenti rispetto al valore osservabile e quindi facilmente individuabili mediante indagini statistiche non particolarmente raffinate;

- *outlier* corrispondenti ad errori grossolani di entità più piccola (prossima a 3σ ma anche compresa tra 2σ e 3σ) e quindi più difficili da individuare. In questo caso si preferisce utilizzare tecniche di stima robuste ovvero poco influenzate dalla presenza degli *outlier* stessi.

V.3.1.5 **Carta dei tetti**

La carta dei tetti è una cartografia tematica in cui, degli edifici, vengono rappresentate le coperture (e non la sezione al piede). In particolare si descrivono i tetti piani, le falde con indicazione della pendenza, i colmi ecc. mediante punti e polilinee tridimensionali. Viene generalmente prodotta come tematismo aggiuntivo di una cartografia numerica ordinaria a grande scala.

V.3.1.6 **Scala nominale**

Nella cartografia tradizionale al tratto, la scala di rappresentazione è un parametro che dà chiare e consolidate indicazioni su:

- precisione metrica della carta (legata al cosiddetto *%errore di graficismo+*)
- densità dell'informazione (natura e dettagli degli oggetti cartografati).

Nell'ortofoto, in cui la rappresentazione cartografica è di tipo fotografico, quest'ultimo aspetto non è attinente (non viene effettuata nessuna selezione delle informazioni, il cui dettaglio appare limitato solo dalla risoluzione dell'immagine digitale), ma sussiste la considerazione della precisione metrica, determinata dalle specifiche tecniche della produzione (quota di volo, appoggio a terra, processo fotogrammetrico, δ).

Per definizione, quindi, si dice *%scala nominale+* di una ortofoto la massima scala alla quale la si può *%accertamente+* riprodurre mediante un plotter o mediante un video. grafico in modo che essa garantisca una precisione metrica corrispondente a quella che avrebbe una carta tradizionale o numerica alla stessa scala.

Si noti che la visualizzazione su video o su plotter consente -o per meglio dire invoglia- a rappresentare l'ortofoto digitale a scala maggiore di quella nominale, utilizzando delle semplici funzioni di *zoom*.

Fermo restando che l'ingrandimento deve sempre essere considerato a rischio e pericolo dell'utente, sarebbe tuttavia eccessivo vederlo alla stregua dell'oscurato ingrandimento fotografico della cartografia tradizionale: in questo caso la visualizzazione a scala maggiore va vista come un'ulteriore possibilità offerta dall'ortofoto digitale per leggere più agevolmente i dettagli degli oggetti fotografati, non certo per aumentarne la qualità metrica.

V.3.1.7 **Metadati**

I metadati sono informazioni che descrivono un insieme di dati quali volume, proprietà, formato, qualità, fonte, genealogia, utilizzabilità, oggetti e relativi attributi, sistema di riferimento ecc..

La definizione classica di metadati è *%dati sui dati+*: i metadati sono una documentazione dei dati principalmente destinata a fornire informazioni utili a un utente per comprendere, confrontare e scambiare il contenuto dei dati descritti.

I metadati sono parte integrante dei dati forniti e caratterizzano sia il prodotto finale sia quelli intermedi.

V.3.1.8 Rapporto di compressione

Il rapporto di compressione (RC) è un termine usato in *computer science* per quantificare la riduzione nella dimensione di dati da memorizzare ottenuta mediante un algoritmo di compressione. Il rapporto di compressione è definito come rapporto tra la dimensione non compressa (dnc) e la dimensione compressa dei dati (dc):

$$RC = \frac{dnc}{dc}$$

Per esempio, un algoritmo che comprima un file da 10 Mb in 2Mb ha un rapporto di compressione $10/2 = 5$, spesso indicato come rapporto esplicito 5:1 o come rapporto implicito 5X.

V.3.1.9 Compressione lossy

È un algoritmo di compressione, applicato anche alle immagini digitali, che determina una perdita d'informazione senza una visibile perdita di qualità dell'immagine ricostruita. Viene utilizzato da formati compressi come il JPeG, l'ECW e il JPeG2000. Chiaramente la perdita d'informazione è via via maggiore al crescere del rapporto di compressione (conviene limitarlo) e si somma a ogni nuovo salvataggio dell'immagine digitale.

V.3.1.10 Compressione lossless

È un algoritmo di compressione, applicato anche alle immagini digitali, senza alcuna perdita di informazione dell'immagine ricostruita, ovvero l'immagine originale e l'immagine memorizzata e ricostruita sono identiche. Un esempio è la tecnica LZW utilizzata in alcune versioni del formato TIFF.

V.3.1.11 File di georeferenziazione di immagini digitali (TFW, JGW, BPW, Å)

In alternativa all'utilizzo del formato GeoTIFF, è possibile utilizzare un generico formato per l'immagine digitale (TIF, JPeG, BMP, Å) e associare un file avente lo stesso nome dell'immagine digitale ma estensione che termina con la lettera W (TFW, JGW, BPW, Å) Questo file è un semplice file di testo (ASCII) composto da 6 linee del tipo:

```
2.4384
0.0000
0.0000
-2.4384
441794.4342
5094101.4520
```

Questi numeri sono i 6 coefficienti di una trasformazione affine che lega le coordinate (i, j) del centro del *pixel* individuato dalla riga i -esima e dalla colonna j -esima (riga e colonna) con le coordinate cartografiche (E, N) secondo la relazione seguente:

$$E = a j + b i + c$$

$$N = d j + e i + f$$

Questi 6 coefficienti sono scritti, all'interno del file, nell'ordine a, b, d, e, c, f .

V.4 ACRONIMI

B/N	bianco e nero
CE95	<i>Circular Error</i> al 95 % di probabilità
CP	<i>Check Point</i>
CT	Carta Tecnica
CTR	Carta Tecnica Regionale
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DSM	<i>Digital Surface Model</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
DDEM	<i>Dense Digital Elevation Model</i>
DDSM	<i>Dense Digital Surface Model</i>
DDTM	<i>Dense Digital Terrain Model</i>
ECW	<i>Enhanced Compressed Wavelet</i>
FMC	<i>Forward Motion Compensation</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GDOP	<i>Global Dilution Of Precision</i>
GEOTIFF	<i>GEOgraphic Tagged Image File Format</i>
gon	unità di misura di un angolo nel sistema centesimale
LE95	<i>Linear Error</i> al 95% di probabilità
MCP	<i>Map Control Point</i>
sqm	scarto quadratico medio (σ)
TDI	<i>Time Delay and Integration</i>
TOP	<i>True OrthoPhoto</i> (ortofoto di precisione)

VI RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

VI.1 RIFERIMENTI NORMATIVI

- [1] *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*, National Spatial Data Infrastructure (USA), Federal Geographic Data Committee, Subcommittee for Base Cartographic Data Federal Geographic Data Committee, cod. FGDC-STD-007.3-199
- [2] *Intesa GIS: Prescrizioni Tecniche per la produzione di Modelli Digitali del Terreno - Versione 16l del 29 Aprile 2001 (DTM16l_Spec_Apr01_it)*
- [3] *Ortofoto digitali in scala nominale 1:10000: prescrizioni per l'impiego del modello digitale del terreno di livello 1*, CNIPA, Comitato tecnico nazionale per il coordinamento informatico dei dati territoriali- Gruppo di lavoro Ortofoto e DEM
- [4] *Ortofoto digitali in scala nominale 1:10000: prescrizioni per l'inquadrimento geometrico e la triangolazione aerea - spe. 1 (in assenza di dati provenienti da sistemi inerziali)*, CNIPA, Comitato tecnico nazionale per il coordinamento informatico dei dati territoriali- Gruppo di lavoro Ortofoto e DEM
- [5] *Ortofoto digitali in scala nominale 1:10000: prescrizioni per l'utilizzo di carte tecniche regionali*, CNIPA, Comitato tecnico nazionale per il coordinamento informatico dei dati territoriali- Gruppo di lavoro Ortofoto e DEM
- [6] *Ortofoto digitali in scala nominale 1:10000: prescrizioni per la ripresa aerofotogrammetrica - spe. 1 (riprese con pellicola fotografica b/n, colore o falso colore)*, CNIPA, Comitato tecnico nazionale per il coordinamento informatico dei dati territoriali- Gruppo di lavoro Ortofoto e DEM
- [7] *Ortofoto digitali in scala nominale 1:10000: standard di riferimento*, CNIPA, Comitato tecnico nazionale per il coordinamento informatico dei dati territoriali- Gruppo di lavoro Ortofoto e DEM
- [8] *REPERTORIO NAZIONALE DEI DATI TERRITORIALI - Linee guida per l'applicazione dello Standard ISO 19115 Geographic Information . Metadata (vers. 0.1 e s.m.i.)* emanato dal Comitato tecnico nazionale per il coordinamento informatico dei dati territoriali, istituito con Decreto del Ministro per l'Innovazione e le Tecnologie in base a quanto previsto dall'art. 59 del Codice dell'Amministrazione Digitale
- [9] ASPRS Lidar Committee (PAD), (2004) *ASPRS Guidelines, Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data, Version 1.0* , Editor Martin Flood
www.asprs.org/society/committees/lidar/Downloads/Vertical_Accuracy_Reporting_for_Lidar_Data.pdf
- [10] FEMA (Federal Emergency Management Agency) (2008). *LIDAR Specifications for Flood Hazard Mapping*, Appendix 4b: *Airborne Light Detection And Ranging systems*, http://www.fema.gov/plan/prevent/fhm/lidar_4b.shtml (ultima consultazione 6 giugno 2008)
- [11] ISO/IEC 15444: *Information technology -- JPEG 2000 image coding system*, Parti 1-8
- [12] ISO/TC 211: *TS 19138 - Geographic information - Data quality measures - N 2029* del 5 giugno 2006 (211n2029)
- [13] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare - Direzione Generale per la Difesa del Suolo (2007). *Piano straordinario di telerilevamento ambientale ad alta*

precisione per le aree ad elevato rischio idrogeologico: fornitura di dati, sistemi e servizi per la realizzazione del sistema informativo del piano straordinario di telerilevamento ambientale (PST-A) - Disciplina Tecnica, Roma

VI.2 BIBLIOGRAFIA

VI.2.1 LIBRI

- [14] Autori Vari, (2004), *Manual of photogrammetry, Fifth edition*, ed. ASPRS
- [15] Kauss K. (1997), *Photogrammetry - Advanced methods and applications* (vol.2), Ferd Dümmler Verlag-Bonn
- [16] Kraus K., traduzione e integrazioni S. Dequal (1998), *Fotogrammetria*, L&B Torino
- [17] Maune D.F (2007), *Digital Elevation Model Technologies and Applications: the DEM Users Manual, 2nd Edition*, ed. ASPRS
- [18] Rinaudo F., Guarnieri A., Vettore A., Visentini D., Bonora V., Tucci G., Bini M., Forlani G. (2006), *Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio*, Alinea Editrice s.r.l.

VI.2.2 ARTICOLI

- [19] Agosto E., Lingua A. (2007), *L'ortofoto solida di precisione a grandissima scala in ambito urbano*, In: XI conferenza nazionale ASITA, ASITA (ITA), Torino
- [20] Baltsavias E. P., Stallmann D. (2003), *SPOT stereo matching for Digital Terrain Model generation*, Proc. of 2nd Swiss Symposium on Pattern Recognition and Computer Vision, pp. 61-72, Zurich
- [21] Barazzetti L., Brovelli M. A., Scaioni M., (2008). *Generation of True-Orthophotos with Lidar High Resolution Digital Surface Models*, The Photogrammetric Journal Of Finland, Published by The Finnish Society of Photogrammetry and Remote Sensing and Institute of Photogrammetry and Remote Sensing Helsinki University of Technology, vol. 21, 2008, n. 1, pp. 26-36.
- [22] Barazzetti L., Brovelli M. A., Cilloccu F., Melis M., Vacca G. (2007). *Controllo della qualità del DTM LiDAR nelle aree urbanizzate della costa della Sardegna da Porto Rotondo a San Teodoro*, Bollettino SIFET, n. 3 - 2007, pp. 9-21.
- [23] Benciolini B., Biagi L., Crespi M., Manzino A., Roggero M., Sansò F. (2007). *Materializzazione dei sistemi di riferimento mediante i servizi di posizionamento satellitari*, in PRIN 2004: I Servizi di posizionamento satellitare per lo e-government
- [24] BIASION A., Dequal S., Lingua A. (2004), *A new procedure for the automatic production of true orthophotos*, in IAPRS, Vol. XXXV
- [25] Borgefors G., (1986) *Distance Transformations in Digital Images*, CVGIP(34), No. 3, pp. 344-371.
- [26] Borgefors G., (1988), *Hierarchical chamfer matching: A parametric edge matching algorithm*, IEEE Trans. on PAMI, vol. 10, No. 6, 1988, pp. 849- 865

- [27] Brovelli M. A., Crespi M., Fratarcangeli F., Giannone F. and Realini E. (2008). *Accuracy assessment of high resolution satellite imagery orientation by leave-one-out method*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing , vol 63 . issue 4 . July 2008, pp. 427-440.
- [28] Büyüksalih G., Jacobsen K. (2007), *Comparison of DEM Generation by Very High Resolution Optical Satellites*, EARSeL Band "New Developments and Challenges in Remote Sensing". Rotterdam : Millpress, Warschau, p. 627-637
- [29] Casella, V., Franzini, M., Kocaman, S., Gruen, A., 2007. *Triangulation and Self-calibration of the ADS40 Imagery: A Case Study over the Pavia Test Site*. Proceedings of the 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques+, Zurich, Switzerland, 9-12 July, Vol. I, pp. 223-232
- [30] Comoglio G; Lingua A. (2000), *Metodologia per il controllo di qualità di un DEM*, Rivista del Dipartimento del Territorio, pp. 75-88, 2000, Vol. 2, ISSN: 1122-4436
- [31] Dequal S., Lingua A. (2002), *Ortofoto di precisione del Comune di Torino*, Atti VI conferenza nazionale ASITA
- [32] Dequal S., Lingua A., Rinaudo F. (2001), *Ortofoto digitale di precisione*, Bollettino SIFET, supplemento al n. 2/2001
- [33] Flotron A. , Kölbl O. (2000), *Precision Terrain Models for Civil Engineering*, OEEPE Publication, P 32-134
- [34] Förstner, W., (1986), *A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching*, IAPRS, Vol. 26, Part 3/3, pp. 150-166
- [35] Galetto R. (2006), *Camere digitali per riprese aeree e terrestri*, Atti Conferenza Nazionale ASITA
- [36] Giulio Tonolo F., Nex f., Lingua A. (2007), *Controllo di qualità a scala regionale di DTM acquisiti mediante tecniche SAR (SRTM)*, in: Dal rilevamento fotogrammetrico ai data base topografici, Convegno nazionale SIFET, Arezzo, isbn: 88-901939-4-8
- [37] Greenwalt, C.R., Schultz M.E. (1968), *Principles and Error Theory and Cartographic Applications*, ACIC Technical Report No. 96: St. Louis, Mo., Aeronautical Chart and Information Center, , 89 p.
- [38] Grün, A. (1985), *Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique*. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography 14 (3), pp. 175-187
- [39] Jacobsen K., Zeitler W., (2002), *Geometric calibration of the DMC: method and results*, Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings
- [40] Maas H. G. (1996), *Automatic DEM generation by multi-image feature based matching*, IAPRS Vol. 31, Part B3, pp. 484-489
- [41] Shultz M. E. (1963), *Circular error probability of quantity affected by a bias*, Study number 6, Aeronautical Chart and Information Center, Chart Research Division, Geophysical and Space Sciences Branch, U.S. Air Force

VI.2.3 SITI INTERNET

- [42] <http://www.aplanix.com/>
- [43] <http://www.digitalglobe.com>
- [44] <http://www.dimacsystems.com/>
- [45] <http://www.geoeye.com>
- [46] <http://www.imagesatintl.com>
- [47] <http://www.intergraph.com/photo/ia.aspx>
- [48] <http://www.jena-optronik.com/cps/rde/xchg/optronik>
- [49] <http://www.jpeg.org/jpeg2000f>
- [50] <http://www.leica-geosystems.com/>
- [51] <http://www.nrsa.gov.in>
- [52] <http://www.remotesensing.org/geotiff/spec/geotiffhome.html>
- [53] <http://www.spotimage.fr>
- [54] <http://www.vexcel.com/>
- [55] <http://www.vingeo.com/das.html>
- [56] <http://www.wehrliassoc.com/>