

An aerial photograph of a city, likely Rome, with a red 3D model of the buildings overlaid on top. A black grid is superimposed over the entire image, representing a coordinate system. The text is centered and overlaid on the grid.

**ORTOIMMAGINI
E MODELLI ALTIMETRICI
A GRANDE SCALA**

LINEE GUIDA

Maria Antonia BROVELLI

Alberto CINA

Mattia CRESPI

Andrea LINGUA

Ambrogio MANZINO

Luigi GARRETTI

CISIS

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

I GENERALITÀ

I.1 INDICE

I	GENERALITÀ	3
I.1	INDICE	5
I.2	PREFAZIONE	9
I.2.1	IL GRUPPO DI LAVORO	11
II	ORTOFOTO ORDINARIA E DI PRECISIONE A GRANDE E GRANDISSIMA SCALA	13
II.1	SPECIFICHE TECNICHE GENERALI	15
II.1.1	<i>Sistema di riferimento</i>	15
II.1.2	<i>Taglio dei fogli</i>	15
II.1.2.1	Scala nominale 1:5000	16
II.1.2.2	Scala nominale 1:2000	17
II.1.2.3	Scala nominale 1:1000	18
II.1.2.4	Scala nominale 1:500	20
II.1.2.5	Prototipo di stampa dei fogli	21
II.1.3	<i>Tolleranza planimetrica</i>	23
II.1.4	<i>Risoluzione geometrica</i>	25
II.1.5	<i>Risoluzione radiometrica</i>	26
II.1.6	<i>Formato dei dati digitali</i>	26
II.1.7	<i>Data del rilievo</i>	27
II.1.8	<i>Metadati</i>	27
II.1.9	<i>Produzione delle ortofoto digitali</i>	27
II.1.9.1	Requisiti delle immagini primarie	27
II.1.9.2	Acquisizione indiretta mediante scansione di immagini analogiche	28
II.1.9.3	Il modello altimetrico	28
II.1.9.4	Punti d'appoggio (GCP) e di controllo (CP)	29
II.1.9.5	Orientamento esterno delle immagini digitali primarie	30
II.1.9.6	Generazione dell'ortofoto e mosaicatura	31
II.1.9.7	La ripresa aerea	32
II.1.10	<i>Verifiche di qualità</i>	32
II.1.10.1	Le verifiche di qualità interna	33
II.1.10.1.1	Verifica dei requisiti delle immagini di partenza	33
II.1.10.1.2	Verifica della procedura di scansione	33
II.1.10.1.3	Verifica di precisione su punti di appoggio e di controllo	33
II.1.10.1.4	Verifica della corrispondenza del modello altimetrico	33
II.1.10.2	Le verifiche di qualità sul prodotto finale	33
II.2	PRESCRIZIONI PER LA RIPRESA FOTOGRAMMETRICA	35
II.2.1	<i>Il volo fotogrammetrico</i>	35
II.2.1.1	Caratteristiche del volo	35
II.2.1.2	Caratteristiche dei velivoli	35
II.2.1.3	Caratteristiche delle camere da presa	36
II.2.1.4	Caratteristiche dei voli	36
II.2.1.5	Epoca dei voli	37
II.2.1.6	Piano di volo	38
II.2.2	<i>Utilizzo di tecniche di fotogrammetria diretta</i>	38
II.2.2.1	La strumentazione GNSS a bordo e relative misure	38
II.2.2.2	I sistemi inerziali	39
II.2.2.3	Le stazioni a terra	39
II.2.3	<i>Materiale da consegnare al termine del volo</i>	40
II.2.4	<i>Il controllo di qualità</i>	40
II.2.4.1	Il controllo della strumentazione	40
II.2.4.2	Il controllo di qualità interna	41

II.2.4.2.1	Il collaudo del volo	41
II.2.4.2.2	Le misure GNSS per la determinazione dei centri di presa	42
II.2.4.2.3	La georeferenziazione diretta	42
II.3	L'ortofoto solida	43
II.3.1	<i>Definizione</i>	43
II.3.1.1	Tipologie	44
II.3.2	<i>Specifiche tecniche generali</i>	45
II.3.2.1	La struttura di base dell'ortofoto solida	45
II.3.2.2	Il formato dei dati digitali	46
II.3.2.3	La struttura estesa dell'ortofoto solida	47
II.3.2.4	Data del rilievo	48
II.3.2.5	Metadati	48
II.3.3	<i>PRODUZIONE DELL'ORTOFOTO SOLIDA</i>	49
II.3.4	<i>Verifiche di qualità</i>	49
II.3.4.1	Le verifiche di qualità interna	49
II.3.4.1.1	Verifica dei requisiti dell'ortofoto	49
II.3.4.1.2	Verifica dei requisiti del modello altimetrico	49
II.3.4.1.3	Verifica della coerenza tra le informazioni memorizzate nei vari file	49
II.3.4.2	Le verifiche di qualità sul prodotto finale	49
III	MODELLI ALTIMETRICI A GRANDE SCALA	51
III.1	SPECIFICHE TECNICHE GENERALI	53
III.1.1	<i>Funzione dei modelli altimetrici</i>	53
III.1.2	<i>Tipologie principali e contenuti</i>	53
III.1.3	<i>Il seminato di punti</i>	55
III.1.4	<i>Sistemi di riferimento e di coordinate</i>	55
III.1.5	<i>Requisiti di qualità dei modelli altimetrici</i>	57
III.1.6	<i>Il formato dei dati</i>	61
III.1.7	<i>Dati vettoriali</i>	65
III.1.8	<i>Data del rilievo</i>	65
III.1.9	<i>Livelli di Precisione dei modelli altimetrici</i>	65
III.1.9.1	Specifiche per il livello 1	66
III.1.9.2	Specifiche per il livello 2	66
III.1.9.3	Specifiche per il livello 3	67
III.1.9.4	Specifiche per il livello 4	68
III.1.9.5	Specifiche per il livello 5	68
III.1.9.6	Specifiche per il livello 6	69
III.1.9.7	Specifiche per il livello 7	70
III.1.9.8	Specifiche per il livello 8	70
III.1.9.9	Specifiche per il livello 9	71
III.1.10	<i>Le verifiche di qualità</i>	72
III.1.10.1	Le verifiche di qualità interna	72
III.1.10.1.1	Il controllo di densità e completezza	72
III.1.10.1.2	Controllo dell'assenza di blunders	72
III.1.10.2	Le verifiche di qualità sul prodotto finale	72
III.1.10.2.1	Valutazione dell'accuratezza tridimensionale	72
III.1.10.2.2	Procedure di riallineamento e eliminazione di errori sistematici	72
III.1.10.2.3	Verifica finale	73
III.1.10.2.4	La verifica globale	73
III.1.10.2.5	La verifica delle breakline	74
III.2	PRODUZIONE MEDIANTE TECNICHE LIDAR A GRANDE SCALA	77
III.2.1	<i>Descrizione del sistema e modalità operative</i>	77
III.2.2	<i>Caratteristiche generali dell'acquisizione dati</i>	78
III.2.3	<i>Elaborazione dei dati primari</i>	83
III.2.3.1	Definizione delle quote ortometriche	84
III.2.3.3	Dati elaborati e prodotti finali di consegna	85

III.2.4	<i>Il controllo di qualità</i>	85
III.2.4.1.1	La verifica del volo	86
III.2.4.1.2	La verifica dell'elaborazione dei dati	86
III.3	PRODUZIONE MEDIANTE TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE A GRANDE SCALA	87
III.3.1	<i>Generalità sull'impiego della fotogrammetria</i>	87
III.3.2	<i>L'acquisizione dei dati per i modelli altimetrici</i>	87
III.3.2.3.1	Caratteristiche dei velivoli	89
III.3.2.3.2	Caratteristiche delle camere da presa	89
III.3.2.3.3	Caratteristiche dei voli	90
III.3.2.3.4	Epoca dei voli	91
III.3.2.3.5	Piano di volo	92
III.3.2.3.6	Approntamento delle immagini in forma digitale	Errore. Il segnalibro non è definito.
III.3.2.3.7	Materiale da consegnare al termine del volo	92
III.3.2.5.1	Generazione automatica del modello altimetrico	93
III.3.2.5.2	Restituzione fotogrammetrica manuale	94
III.3.3	<i>Il controllo di qualità</i>	95
III.3.3.1.1	Il controllo di qualità interna	95
III.3.3.1.2	Il collaudo del volo	96
III.3.3.1.3	Collaudo della digitalizzazione dei fotogrammi (eventuale)	96
III.4	PRODUZIONE MEDIANTE CARTOGRAFIA NUMERICA ESISTENTE A GRANDE SCALA	99
III.4.1	<i>Introduzione</i>	99
III.4.2	<i>Caratteristiche della carta numerica utilizzata</i>	100
III.4.3	<i>La verifica preliminare del livello di aggiornamento</i>	101
III.4.4	<i>L'acquisizione dati per i modelli altimetrici da cartografia numerica esistente</i>	101
III.4.5	<i>Il controllo di qualità</i>	103
IV	SOVRAPPOSIZIONE CON CARTOGRAFIA CATASTALE	105
IV.1	La cartografia catastale	107
IV.1.1	<i>Alcune generalità sui sistemi di riferimento catastali</i>	107
IV.2	procedure per Il recupero rigoroso della cartografia catastale	109
IV.2.1	<i>Trasformazioni "globali" da sistemi catastali a WGS84</i>	109
IV.2.1.1	Trasformazioni "globali" per punti di doppie coordinate	109
IV.2.1.2	Trasformazioni "globali" per origini dei sistemi d'asse	110
IV.2.2	<i>Reperimento dei punti di doppie coordinate</i>	111
IV.2.3	<i>Verifiche di qualità</i>	112
IV.2.3.1	Le verifiche di qualità interna	113
IV.2.3.2	Le verifiche di qualità sul prodotto finale	114
V	GLOSSARIO, ACRONIMI, BIBLIOGRAFIA	116
V.1	tIPOLOGIE	117
V.1.1	<i>TIPOLOGIE DEI MODELLI ALTIMETRICI E CONTENUTI</i>	117
V.1.1.1	DTM (Digital Terrain Model) o DEM (Digital Elevation Model)	117
V.1.1.2	DSM (Digital Surface Model)	117
V.1.1.3	DDTM (Dense Digital Terrain Model) o DDEM (Dense Digital Elevation Model)	117
V.1.1.4	DDSM (Dense Digital Surface Model)	118
V.1.1.5	TIN (Triangulated Irregular Network)	118
V.1.1.6	Triangolazione di Delaunay	118
V.1.2	<i>TIPOLOGIE DI ORTOFOTO</i>	119
V.1.2.1	In funzione dell'utilizzo	119
V.1.2.2	In funzione del contenuto	119
V.1.2.2.1	B/N o pancromatico	119
V.1.2.2.2	A colori (RGB, True color)	119
V.1.2.2.3	Falso colore	119
V.1.2.2.4	Multispettrale, Iperspettrale	120

V.1.2.3	In funzione dell'accuratezza	120
V.1.2.3.1	Speditiva	120
V.1.2.3.2	Ordinaria	121
V.1.2.3.3	Di precisione	121
V.2	TERMINOLOGIA	123
V.2.1	<i>Altezza ellissoidica, quota ortometrica e ondulazione del geoide</i>	123
V.2.2	<i>Interpolazione</i>	124
V.2.3	<i>Hot-spot</i>	124
V.2.4	<i>Precisione, accuratezza e tolleranza</i>	126
V.2.5	<i>Errori grossolani</i>	129
V.2.6	<i>Carta delle coperture</i>	129
V.2.7	<i>Scala nominale</i>	130
V.2.8	<i>Metadati</i>	131
V.2.9	<i>compressione</i>	131
V.2.9.1	il rapporto di compressione	131
V.2.9.2	Compressione lossy	131
V.2.9.3	Compressione lossless	132
V.2.10	<i>Schemi semplificati per alcuni formati di dati consigliati</i>	132
V.2.10.1	Il formato LAS	132
V.2.10.2	File di georeferenziazione di immagini digitali	139
V.2.10.3	Formati comuni per la memorizzazione di immagini multi/iper-spettrali	140
V.3	ACRONIMI	143
V.4	Riferimenti bibliografici	145
V.4.1	<i>Riferimenti normativi</i>	145
V.4.2	<i>Libri</i>	146
V.4.3	<i>Articoli</i>	146
V.4.4	<i>Siti Internet</i>	149

I.2 PRAFAZIONE

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 e modelli altimetrici a grande scala". 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 il documento "ortoimmagini 10k e DTM" prodotto dallo stesso gruppo di autori e finanziato sempre dal CISIS, inerente la produzione di ortofoto digitali e modelli altimetrici alla scala nominale 1:10000.

Il progetto "Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala" 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. Alberto Cina, Ambrogio Manzino e Andrea Lingua, Politecnico di Torino;
- Prof.ssa M. A. Brovelli, Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como;
- Prof. M. Crespi, Università la Sapienza, Roma;
- Arch. L. Garretti di Regione Piemonte, referenti del Centro Interregionale di Coordinamento e Documentazione per le Informazioni Territoriali;

La conoscenza del territorio di competenza costituisce il dato fondamentale per enti territoriali, istituzioni e agenzie pubbliche che su di esso operano pianificando interventi, stimolando lo sviluppo e gestendo reti e servizi.

Ne consegue che, per ottemperare ai propri scopi istituzionali, questi enti hanno necessità di dotarsi di informazioni e strumenti necessari per descrivere in modo corretto e completo il territorio ad una scala adeguata per le finalità preposte.

Se studi ed analisi in ambito regionale possono ritenere adeguata la media scala (1:10000, 10k), numerose applicazioni di gestione e intervento richiedono la disponibilità di informazioni a scala maggiore ovvero a grande scala, 1:5000 (5k) e 1:2000 (2k), o a grandissima scala, 1:1000 (1k) e 1:500 (0.5k).

Queste informazioni possono essere ottenute mediante costose rappresentazioni cartografiche in forma numerica opportunamente strutturate in sistemi informativi territoriali, che richiedono comunque l'uso di strumenti raffinati e adeguate competenze per essere utilizzati nel modo più corretto.

Le ortofoto digitali e i modelli altimetrici costituiscono una possibile alternativa ai dati cartografici numerici in regime di risorse economiche limitate o comunque un loro efficace completamento utile per:

- rendere la cartografia immediatamente comprensibile agli utenti non esperti dell'ambito geomatico che sono comunque in grado di leggere e interpretare correttamente e in modo intuitivo le immagini fotografiche come le ortofoto;
- mettere a disposizione informazioni applicabili, in modo più semplice e immediato, a numerosi studi e analisi territoriali che richiedono spesso dati cartografici semplificati e informazioni tridimensionali sulla superficie del territorio;

- permettere ad ogni utente specialista di un determinato ambito applicativo di estrarre autonomamente le informazioni che meglio descrivono i fenomeni che sta analizzando senza il filtro preventivo di una restituzione cartografica più generale, ovvero non legata alla singola disciplina.

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 a grande scala, provenienti da dati acquisiti da piattaforma aerea.

Grande importanza verrà data alla produzione di ortofoto di precisione e di ortofoto solida di precisione che costituiscono il dato anche tridimensionale a grande scala perfettamente coerente con le informazioni cartografiche relative e permettono di evitare errori di interpretazione legati alle deformazioni prospettiche residue presenti in una ortofoto ordinaria.

In applicazioni a grande scala, assumono grande importanza gli aspetti catastali che verranno analizzati in questo documento proponendo alcune linee guida per la corretta sovrapposizione tra la cartografia catastale e le ortofoto digitali a grande scala.

Accanto agli standard di riferimento che potranno essere considerati validi per molto tempo, si propongono anche alcune norme procedurali legate alle strumentazioni attuali che dovranno essere aggiornate con maggior frequenza in base allo sviluppo tecnico-tecnologico che caratterizza tutto il settore.

Il testo è stato completato con un'analisi delle caratteristiche dei sensori digitali più attuali e una appendice contenente il glossario (con la descrizione delle terminologie più specialistiche), l'indice degli acronimi utilizzati e le fonti bibliografiche.

Le struttura generale del testo riprende l'organizzazione del documento "Ortoimmagini 10k e DTM" ampliandone ovviamente i contenuti e riprendendo alcuni argomenti al fine di garantire l'autoconsistenza di questo documento.

I.2.1 IL GRUPPO DI LAVORO

Luigi
GARRETTI

Responsabile CISIS



Laureato (1975) presso la facoltà di Architettura del Politecnico di Torino, è iscritto all'Ordine Architetti, Pianificatori, Paesaggisti e Conservatori della Provincia di Asti; ha partecipato al corso di formazione Manageriale del Dipartimento della Funzione Pubblica "Campus Cantieri" (edizione per la Regione Piemonte, febbraio-marzo 2005).

Dirigente della Regione Piemonte, è responsabile del Settore Cartografia e SIT e vicario della Direzione Programmazione Strategica, Politiche Territoriali ed Edilizia.

Cura i rapporti all'interno della P. A. piemontese in materia di condivisione ed emanazione di indirizzi per la formazione, l'aggiornamento, la disciplina d'uso e la messa a disposizione di informazioni geografiche, con particolare riferimento a standard di interscambio dati e di interoperabilità tra sistemi.

Rappresenta la Regione a tavoli e comitati istituzionali, a progetti regionali interregionali nazionali ed europei, nonché nel Comitato nazionale per le regole Tecniche sui dati Territoriali delle pubbliche amministrazioni e presso INSPIRE; eletto nell'Assemblea dei soci e nel Comitato Direttivo del CISIS, fa parte dei Comitati Direttivi di AMFM e ASITA.

Docente di corsi formativi regionali in materia di sistema della conoscenza geografica, è autore di lavori inerenti l'informazione geografica presentati a convegni e conferenze nazionali ed europee.

Maria Antonia
BROVELLI



Diploma di maturità classica, laurea con lode 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 Protettrice del Polo di Como del Politecnico di Milano. E' stata docente del corso GIS 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' stata responsabile scientifico del Laboratorio di Geomatica, sito presso il Polo di Como del Politecnico di Milano, è 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*); è inoltre co-chair del WG IV/5 "*Distributed, Web-based Geoinformation Services and Applications*" dell'ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*). E' autrice di 125 pubblicazioni scientifiche.

Si è occupata di tematiche inerenti la Geodesia e la Geomatica: 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 metodi per il trattamento di osservazioni ambientali, database con estensioni spaziali, *webGIS*, geoservizi, mobile e *context-aware GIS*).

Laureato in Ingegneria Civile, consegue il titolo di Dottore di Ricerca nel Dottorato in "Scienze Geodetiche e Topografiche". È attualmente Professore Associato di Topografia e Cartografia presso la 1° Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino. Ottiene l'idoneità a Professore Ordinario nel 2010. Svolge attività didattica, di ricerca e di consulenza nei campi della geomatica.

È autore di circa 90 pubblicazioni tra cui 2 libri di testo universitari. Si è occupato e si occupa di tecniche di posizionamento satellitare e delle loro implicazioni sulle moderne tecniche di rilevamento e gestione del territorio, di applicazioni GNSS nel campo delle reti geodetiche, della fotogrammetria e cartografia, del trattamento delle misure. Svolge attività di ricerca e consulenza nel campo dei sistemi integrati Mobile Mapping System per rilevamenti ad alto rendimento. Si occupa della trasformazione della cartografia catastale verso i nuovi sistemi di riferimento nazionali. Varie le esperienze pilota quali GPS per la determinazione dei centri di presa in fotogrammetria aerea, stazioni permanenti GNSS e reti RTK. Ha rapporti di consulenza e ricerca con vari enti su tematiche geodetiche e cartografiche (Tra i principali: Regione Piemonte, ARPA, Agenzia del Territorio). Ha partecipato ed è stato titolare in diversi progetti di ricerca Cofinanziati dal MIUR. È attualmente membro eletto del Consiglio Direttivo della SIFET e nella Giunta AUTeC (Associazione Universitari di Topografia e Cartografia).

Alberto
CINA



**Mattia Giovanni
CRESPI**



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.

Laurea in Ingegneria Civile (1994), dottorato in Scienze Geodetiche e Topografiche (1998), Andrea Maria LINGUA è professore associato di Topografia e Cartografia dal 2006 presso la I facoltà di Ingegneria del 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.

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*.

E' attualmente segretario del Comitato Scientifico della SIFET (Società Italiana di Fotogrammetria E Topografia).

**Andrea Maria
LINGUA**



**Ambrogio
MANZINO**



Ambrogio Maria Manzino, è nato il 17/10/1955. Il 6/2/1980 si laurea in Ingegneria Civile presso l'Università di Pavia. Attualmente è professore ordinario nel settore ICR/06 presso la I Facoltà di ingegneria del Politecnico di Torino

Nel giugno 2003 è eletto presidente del Comitato Scientifico della SIFET (Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia), fa parte del Direttivo della stessa Società ed è stato membro del Comitato Scientifico ASITA: federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali ed Ambientali. È membro di due Collegi Docenti del Dottorato di Ricerca: "Scienze Geodetiche e Topografiche" (Consorzio Milano e Torino) e "Geoingegneria Ambientale" (Politecnico di Torino).

Dal luglio 2007 a gennaio 2010 è stato presidente del Consiglio di Settore dell'Ingegneria civile ed ambientale della II Facoltà di Ingegneria di Vercelli.

L'attività scientifica è svolta prevalentemente in tre direzioni, in ordine temporale: nel campo della cartografia numerica e della fotogrammetria, nel campo della geodesia fisica e nel campo della geodesia del posizionamento. Tali attività hanno portato alla pubblicazione più di 110 lavori: articoli su atti di congressi internazionali o su riviste nazionali o internazionali.

Ha partecipato ed è stato titolare in diversi progetti di ricerca di ambito europeo (INTERREG, QUAKENET e Helidem), nazionale (PRIN) e regionale (Gal.PMI)

II ORTOFOTO ORDINARIA E DI PRECISIONE A GRANDE E GRANDISSIMA SCALA

II.1 SPECIFICHE TECNICHE GENERALI

Le tipologie di ortofoto considerate sono sostanzialmente 3 e si rimanda al V.1.2 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. In questa parte del documento si analizzano le linee guida legate alle ortofoto ordinarie alla scala nominale grande (1:5000, 1:2000) e grandissima (1:1000, 1:500).

II.1.1 SISTEMA DI RIFERIMENTO

Nella produzione delle ortofoto digitali si prevede l'utilizzo dei seguenti sistemi di riferimento e di coordinate:

- il sistema geodetico (*datum*) ETRS89 nella sua realizzazione ETRF2000 (epoca 2008.0) materializzato dalla Rete Dinamica Nazionale (RDN), con coordinate geodetiche Latitudine, Longitudine, Altezza ellissoidica riferite all'Ellissoide WGS84;
- la rappresentazione cartografica conforme UTM (coordinate cartografiche Est, Nord UTM-WGS84-ETRF2000).

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 documentazione per le informazioni territoriali.

II.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). In Figura 1 è contenuta una rappresentazione del taglio in fogli alle varie scale storicamente proposto dalla Commissione Geodetica per la cartografia a grande e grandissima scala e ripreso in questo documento.

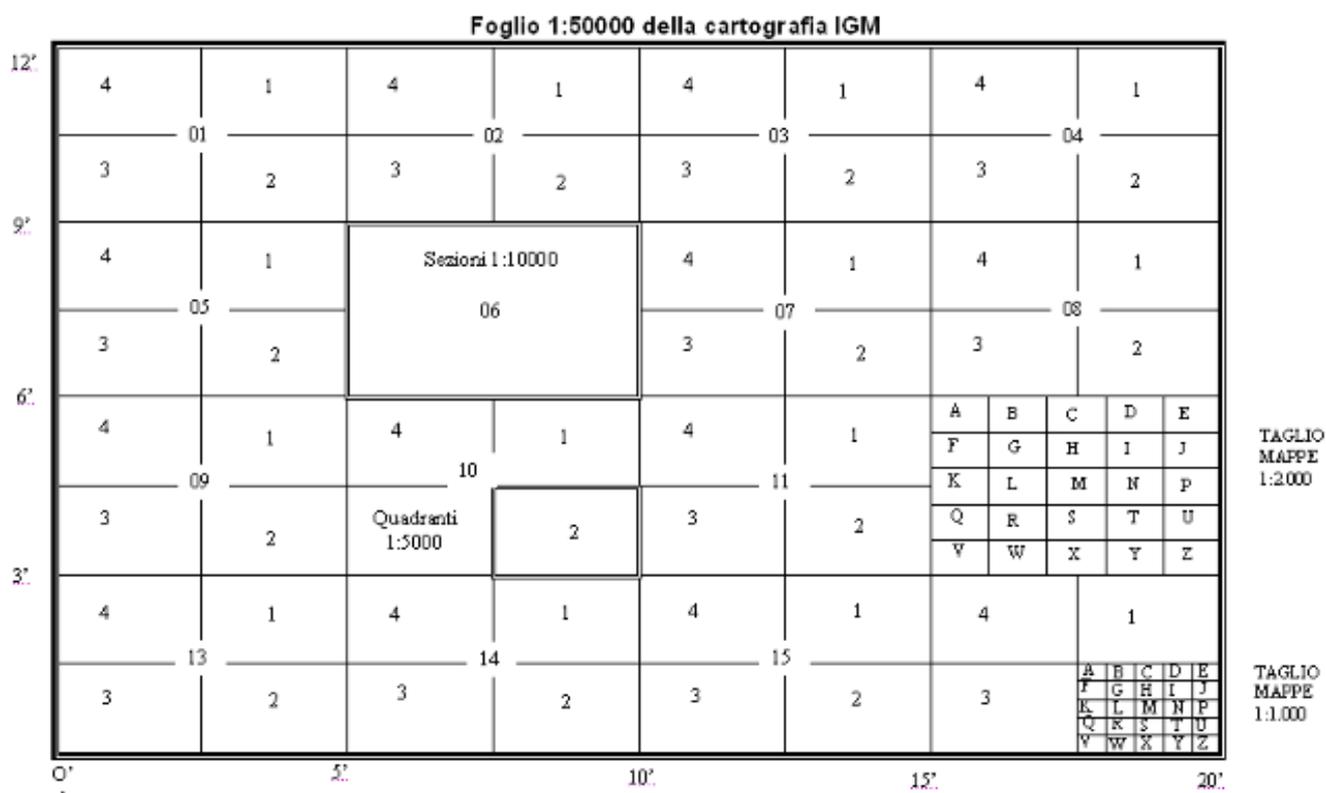


Figura 1 – Il taglio dei fogli di cartografia secondo la Commissione Geodetica

II.1.2.1 Scala nominale 1:5000

A meno di esigenze particolari, legate ad eventuali riferimenti cartografici specifici, quali ad esempio quelli delle Carte Tecniche Regionali (CTR) e provinciali (CTP), il modulo minimo di produzione della ortofoto dovrà essere costituito dalla porzione di territorio, coperta da un “quadrante” alla scala 1:5000 corrispondente a un quarto (2' 30" x 1' 30") di 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 2).

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 CTP, in modo da rendere semplice la ricerca del territorio corrispondente. Le stesse regole dovranno essere seguite dal Quadro d'unione. In generale, il nome di una carta in scala 1:5000 sarà definito come FFFSSQ dove:

- FFF indica il foglio della carta IGM 1:50000;
- SS indica la sezione della carta 1:10000;
- Q indica il quadrante della carta 1:5000.

Ad esempio, una mappa denominata 210064 indica il foglio n. 210 della carta IGM 1:50000, la sezione n. 06 della carta 1:10000, il quadrante n. 4 della carta 1:5000.

		← 2'30" →							
010		024	021	034	031	044	041		
		023	022	033	032	043	042		
1'30"	054	051	064	061	074	071	084	081	
	053	052	063	062	073	072	083	082	
		FFF							
		094	091	104	101	114	111	124	121
		093	092	103	102	113	112	123	122
		134	131	144	141	154	151	160	
		133	132	143	142	153	152		

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 2 - Il modulo minimo di riferimento (il quadrante della carta 1:5000)

II.1.2.2 Scala nominale 1:2000

A meno di esigenze particolari, legate ad eventuali riferimenti cartografici specifici, quali ad esempio quelli delle Carte Tecniche Regionali (CTR) e provinciali (CTP), il modulo minimo di produzione della ortofoto dovrà essere costituito dalla porzione di territorio, coperta da una "mappa" alla scala 1:2000 corrispondente a un venticinquesimo (60"x36") di una "Sezione" a scala 1:10.000 (come specificato in Figura 3).

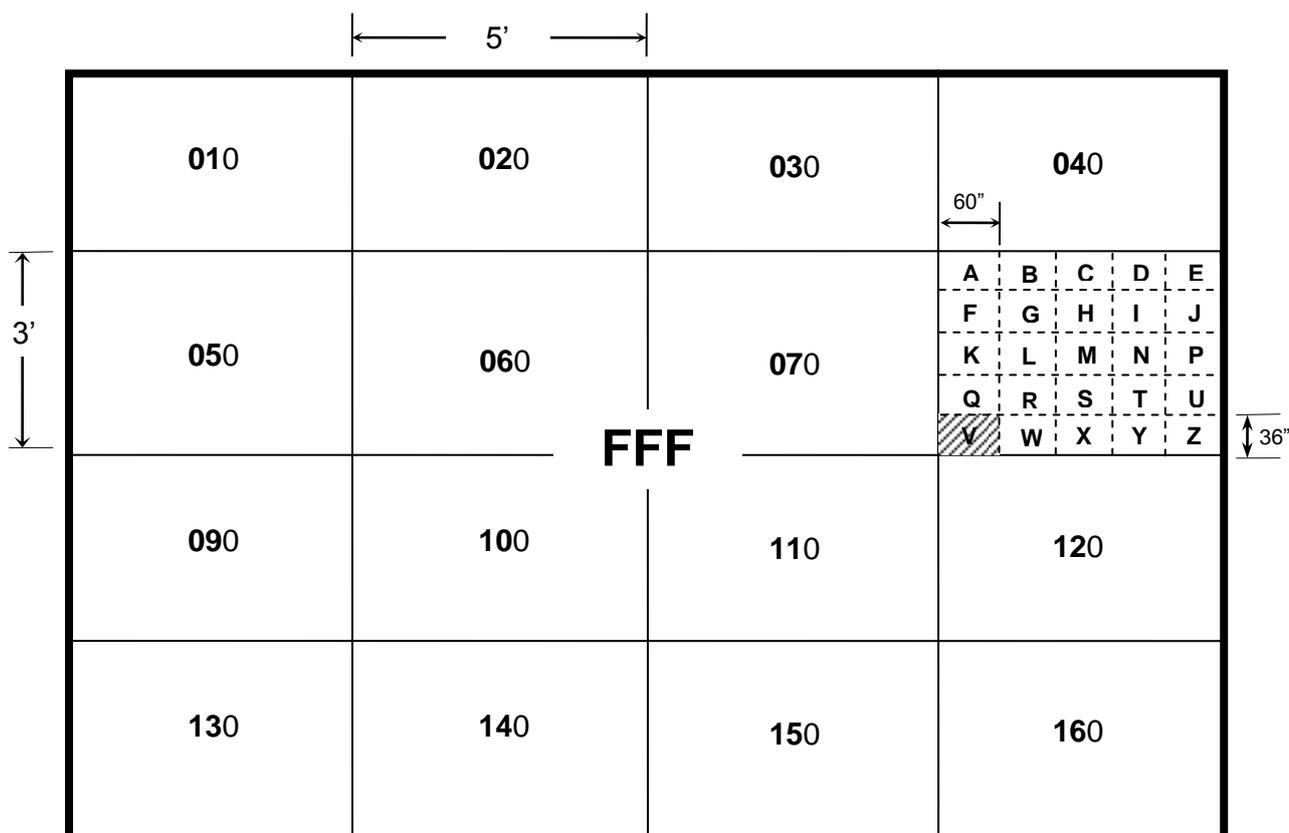
Per rendere semplice la ricerca del territorio corrispondente, l'identificativo di ogni carta (vedi Figura 3) dovrà essere indicato mediante un codice a sette cifre di cui le prime sei cifre numeriche seguono il principio di codifica attualmente in uso nella redazione delle CTR e la settima cifra alfabetica individua la mappa in scala nominale 1:2000. Si usa l'alfabeto internazionale A, B, ..., J, K, ..., M, N, P, ..., W, X, Y, Z ad esclusione della lettera O che si potrebbe confondere con il numero 0, che individua la sezione 1:10000.

In generale, il nome di una carta 1:2000 sarà definito come FFFSSOM dove:

- FFF indica il numero del foglio della carta IGM 1:50000;
- SS0 indica il numero della sezione della carta 1:10000;
- M indica la lettera (maiuscola secondo l'alfabeto internazionale A, B, ..., J, ..., W, X, Y, Z) che individua la mappa della carta 1:2000.

Ad esempio, una mappa denominata 210080V indica il foglio n. 210 della carta IGM 1:50000, la sezione n. 080 della carta 1:10000, la mappa V della carta 1:2000 (mappa in basso a sinistra).

Le stesse regole dovranno essere seguite dal Quadro d'unione.



FFF: nome del Foglio IGM 1:50000.

010, 020, ..., 160: Sezioni alla scala 1:10000. La cifra in corsivo deve essere presente pari a 0.

A, B, ..., J, K, ..., M, N, P, ..., W, X, Y, Z: mappa alla scala 1:2000, si utilizza l'alfabeto internazionale con esclusione della lettera O che si potrebbe confondere con il numero 0, che individua la sezione 1:10000.

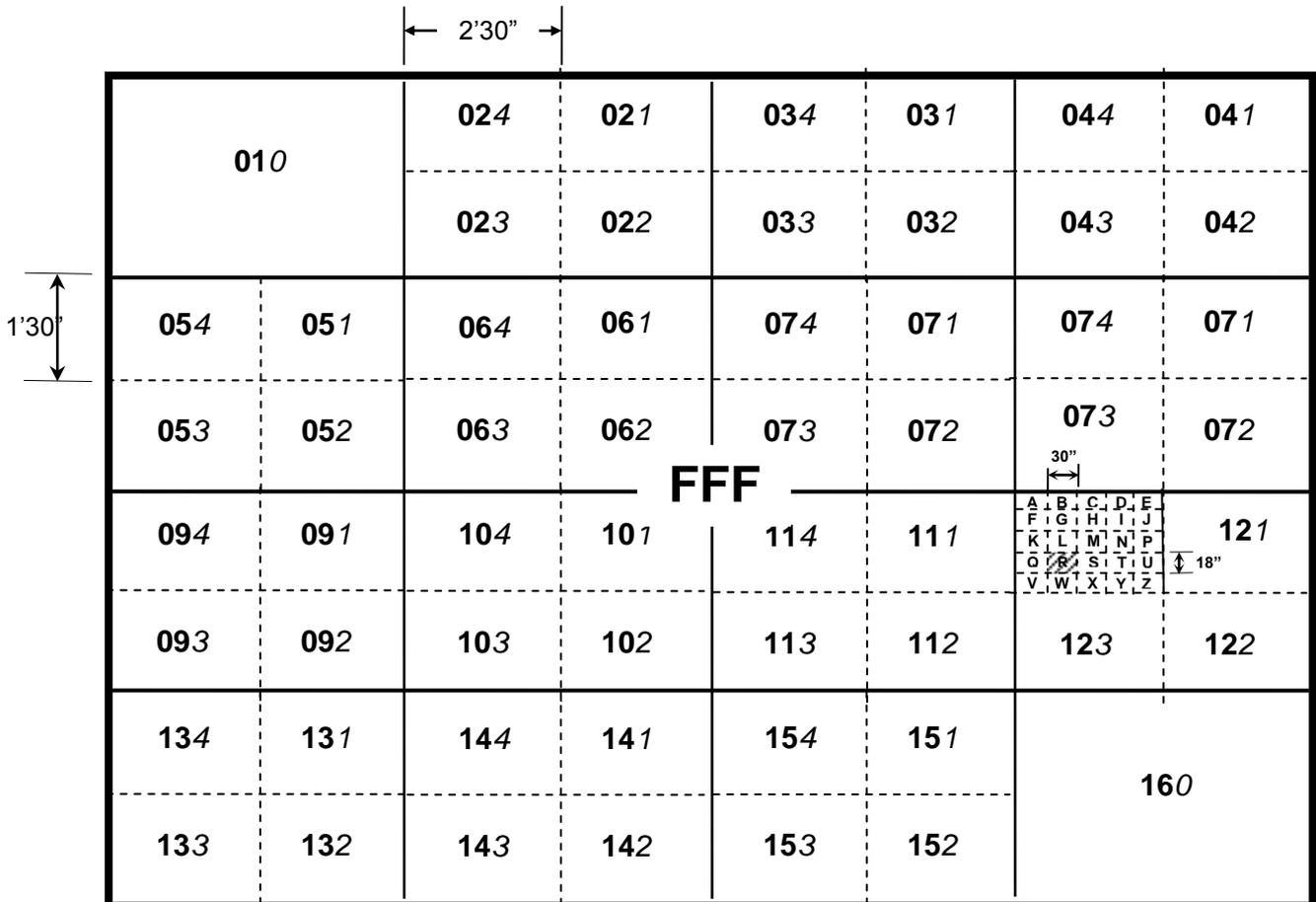
Figura 3 - Il modulo minimo di riferimento: la mappa della carta 1:2000

II.1.2.3 Scala nominale 1:1000

A meno di esigenze particolari, legate ad eventuali riferimenti cartografici specifici, quali ad esempio quelli delle Carte Tecniche Regionali (CTR), provinciali (CTP) e Comunali (CTC), il modulo minimo di produzione della ortofoto dovrà essere costituito dalla porzione di territorio, coperta da una "mappa" alla scala 1:1000 corrispondente a un venticinquesimo (30"x18") di un "Quadrante" alla scala 1:5.000 (come specificato in II.1.2.1).

Per rendere semplice la ricerca del territorio corrispondente, l'identificativo di ogni carta (vedi Figura 4) dovrà essere indicato mediante un codice a nove cifre di cui le prime sei cifre

numeriche individuano il quadrante 1:5000 da cui deriva e la settima cifra alfabetica individua la mappa 1:1000. Si usa l'alfabeto internazionale A, B, ..., J, K, ..., M, N, P, ..., W, X, Y, Z ad esclusione della lettera O che si potrebbe confondere con il numero 0, che individua la sezione 1:10000.



FFF: nome del Foglio IGM 1:50000.

011, 012, 013, 014, 021, 022, 023, ..., 164: quadranti in scala 1:5000 (1, 2, 3, 4) derivati dalle Sezioni alla scala 1:10000 (01, 02, 03, ..., 15, 16);

A, B, ..., J, K, ..., M, N, P, ..., W, X, Y, Z: mappa alla scala 1:1000, si utilizza l'alfabeto internazionale con esclusione della lettera O che si potrebbe confondere con il numero 0, che individua la sezione

Figura 4 - Il modulo minimo di riferimento: la mappa della carta 1:1000

In generale, il nome di una carta in scala 1:1000 sarà definito come FFFSSQM dove:

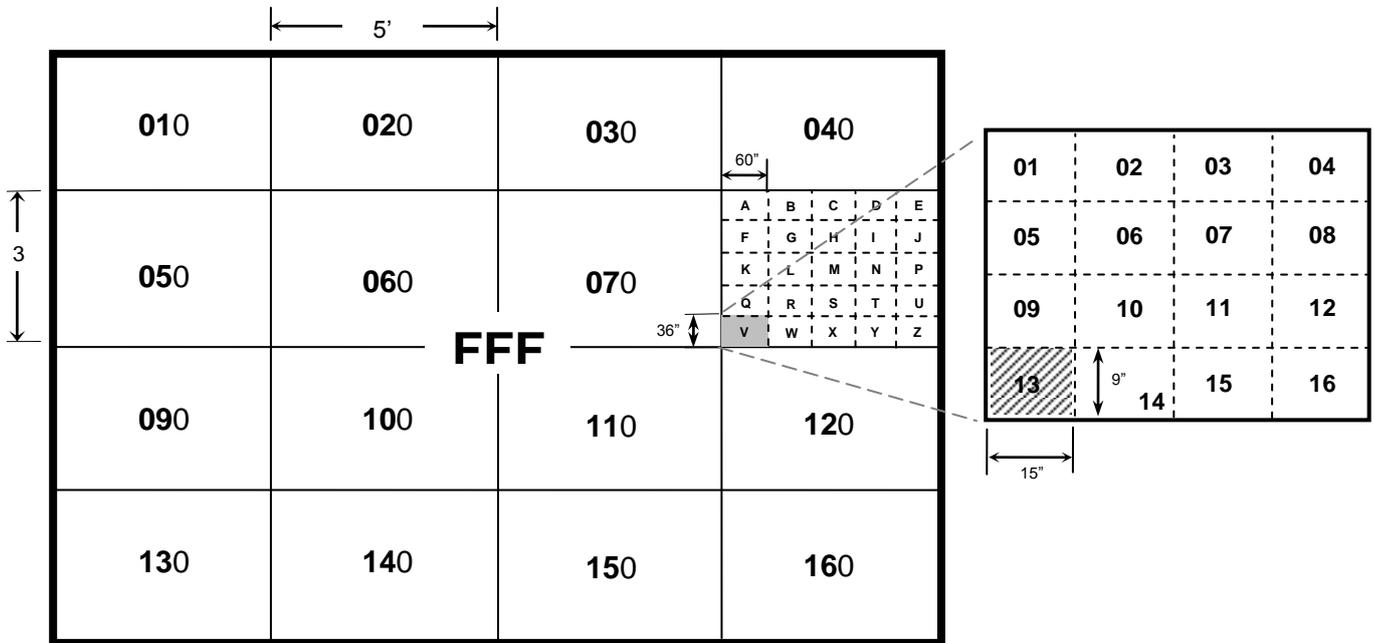
- FFF indica il foglio della carta IGM 1:50000;
- SS indica la sezione della carta 1:10000;
- Q indica il quadrante della carta 1:5000;
- M indica la lettera (maiuscola secondo l'alfabeto internazionale A, B, ..., J, ..., W, X, Y, Z) che individua la mappa della carta 1:1000.

Ad esempio, una mappa denominata 210124R indica il foglio n. 210 della carta IGM 1:50000, la sezione n. 12 della carta 1:10000, il quadrante n. 4 della carta 1:5000, la mappa R della carta 1:1000.

Le stesse regole dovranno essere seguite dal Quadro d'unione.

II.1.2.4 Scala nominale 1:500

A meno di esigenze particolari, legate ad eventuali riferimenti cartografici specifici, quali ad esempio quelli delle Carte Tecniche Regionali (CTR), provinciali (CTP) e Comunali (CTC), il modulo minimo di produzione della ortofoto dovrà essere costituito dalla porzione di territorio, coperta da una "levata" alla scala 1:500 corrispondente a un sedicesimo (15"x9") di una "Mappa" alla scala 1:2.000 (come specificato in II.1.2.2).



FFF: nome del Foglio IGM 1:50000.

010, 020, ..., 160: Sezioni alla scala 1:10000. La cifra in corsivo deve essere presente pari a 0.

A, B, ..., J, K, ..., M, N, P, ..., W, X, Y, Z: mappa alla scala 1:2000, si utilizza l'alfabeto internazionale con esclusione della lettera O che si potrebbe confondere con il numero 0, che individua la sezione 1:10000.

01, 02, 03, 04, ..., 09, 10, 11, ..., 14, 15: levata alla scala 1:500, si utilizzano due caratteri numerici da 1 a 16 antepoendo 0 ai numeri composti da una sola cifra

Figura 5 - Il modulo minimo di riferimento (la levata della carta 1:500)

Per rendere semplice la ricerca del territorio corrispondente, l'identificativo di ogni carta (vedi Figura 5) dovrà essere indicato mediante un codice a sette cifre le prime sei cifre numeriche seguono il principio di codifica attualmente in uso nella redazione delle CTR, la settima cifra alfabetica individua la mappa in scala nominale 1:2000 (II.1.2.2) usando l'alfabeto internazionale A, B, ..., J, K, ..., M, N, P, ..., W, X, Y, Z ad esclusione della lettera O che si potrebbe confondere con il numero 0, che individua la sezione 1:10000, le ultime due cifre (ottava e nona) indicano la levata mediante i numeri da 1 (01) a 16.

In generale, il nome di una carta 1:500 sarà definito come **FFFSS0MLL** dove:

- **FFF** indica il numero del foglio della carta IGM 1:50000;
- **SS0** indica il numero della sezione della carta 1:10000;
- **M** indica la lettera (maiuscola secondo l'alfabeto internazionale A, B, ..., J, ..., W, X, Y, Z) che individua la mappa 1:2000;
- **LL** indica le 2 cifre (01, 02, 03, ..., 15, 16) che individuano la levata 1:500.

Ad esempio, una mappa denominata 210080V04 indica il foglio n. 210 della carta IGM 1:50000, la sezione n. 080 della carta 1:10000, la mappa V della carta 1:2000 (mappa in basso a sinistra), la levata 04 della carta 1:500.

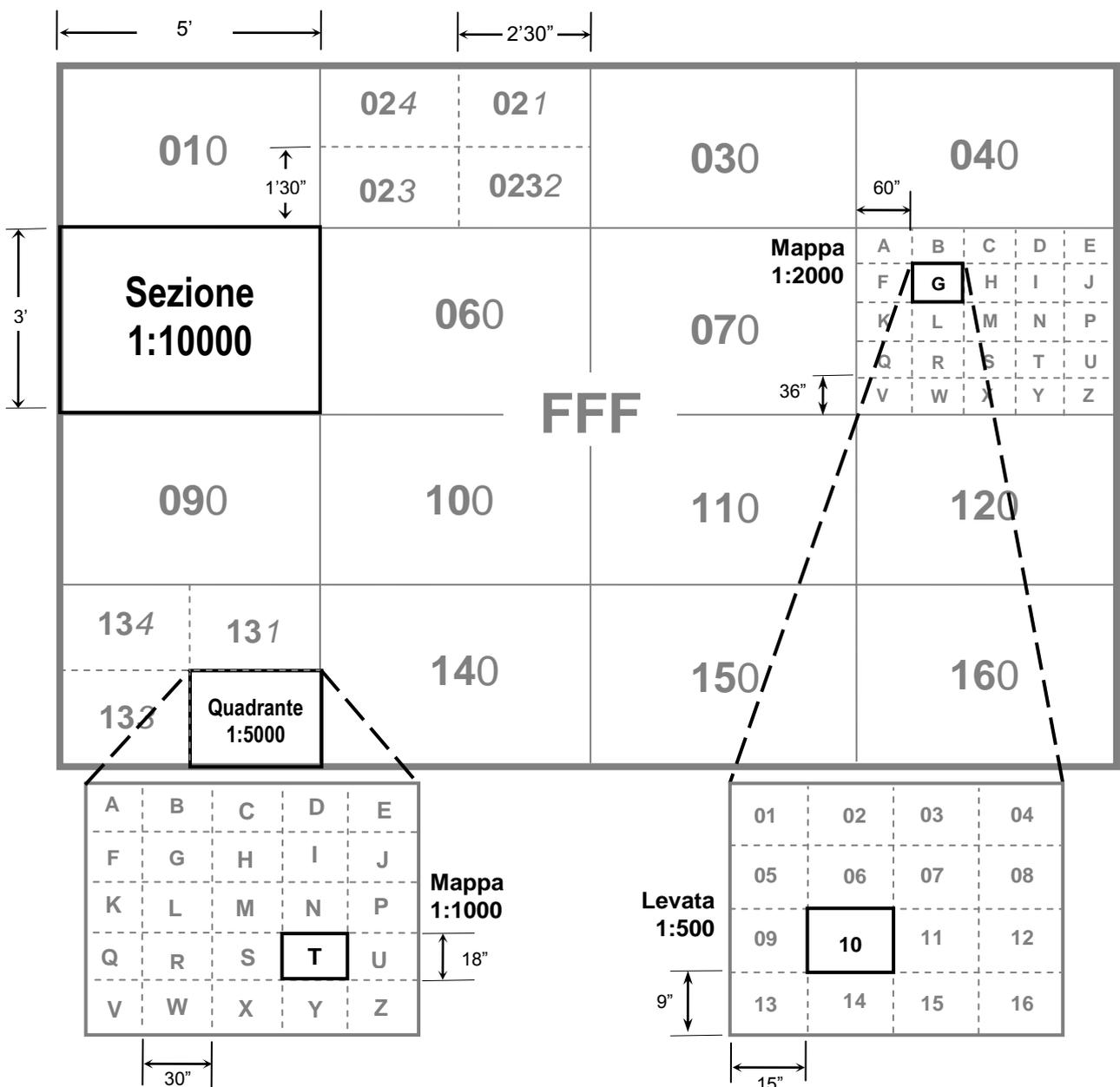


Figura 6 - Schema complessivo del taglio dei fogli previsto alle varie scale

Le stesse regole dovranno essere seguite dal Quadro d'unione.

La Figura 6 contiene lo schema complessivo del taglio in fogli delle cartografie alle varie scale.

II.1.2.5 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

- la definizione delle fonti (volo fotogrammetrico, modello altimetrico, ortofoto) e della loro data di esecuzione/produzione;
- il tipo di ortofoto rappresentata (ordinaria, di precisione, speditiva);
- il grafico delle strisciate fotogrammetriche;
- la situazione cartografica disponibile alla varie scale;
- le coordinate dei vertici, in coordinate geografiche e cartografiche, nei sistemi in uso;
- la definizione del sistema di riferimento utilizzato (datum e rappresentazione cartografica);
- le indicazioni su committente, direzione dei lavori, ditta esecutrice e commissione di collaudo;
- l'indicazione grafica delle direzioni del Nord geografico e del Nord Cartografico e il valore della convergenza del meridiano nel centro del foglio;
- il modulo di deformazione lineare nel centro del foglio
- nel caso di ortofoto di precisione, l'indicazione del colore da associare alla mancanza d'informazione radiometrica.

Il dettaglio dei contenuti, il quadro di unione, 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 8.

II.1.3 TOLLERANZA PLANIMETRICA

Gli sqm planimetrici σ_{EN} e le tolleranze planimetriche T_{EN} per le varie tipologie di ortofoto alle varie scale sono contenute in Tabella 1. Si rimanda al glossario circa la definizione delle varie tipologie di ortofoto e le relative caratteristiche.

Tipo di ortofoto	Elementi geometrici	Precisione grafica	1:5000		1:2000		1:1000		1:500	
			σ_{EN} [m]	T_{EN} (CE95) [m]						
Speditiva (Tipo B)	Punti al suolo	0.3 mm	1.50	2.60	0.60	1.05	0.30	0.55	0.15	0.25
	<i>Punti elevati rispetto alla superficie del terreno</i>	<i>0.9 mm</i>	<i>4.50</i>	<i>7.80</i>	<i>1.80</i>	<i>3.20</i>	<i>0.90</i>	<i>1.60</i>	<i>0.45</i>	<i>0.80</i>
Ordinaria (Tipo A1)	Punti al suolo	0.2 mm	1.00	1.75	0.40	0.70	0.20	0.35	0.10	0.17
	<i>Punti elevati rispetto alla superficie del terreno</i>	<i>0.6 mm</i>	<i>3.00</i>	<i>5.20</i>	<i>1.20</i>	<i>2.10</i>	<i>0.60</i>	<i>1.05</i>	<i>0.30</i>	<i>0.55</i>
Di precisione (Tipo A2)	Tutti i punti rappresentati	0.2 mm	1.00	1.75	0.40	0.70	0.20	0.35	0.10	0.17

Tabella 1 - Tolleranze planimetriche per le varie tipologie di ortofoto

Occorre puntualizzare che per le ortofoto ordinarie e speditive, sono state definite due tolleranze planimetriche determinate dal 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.

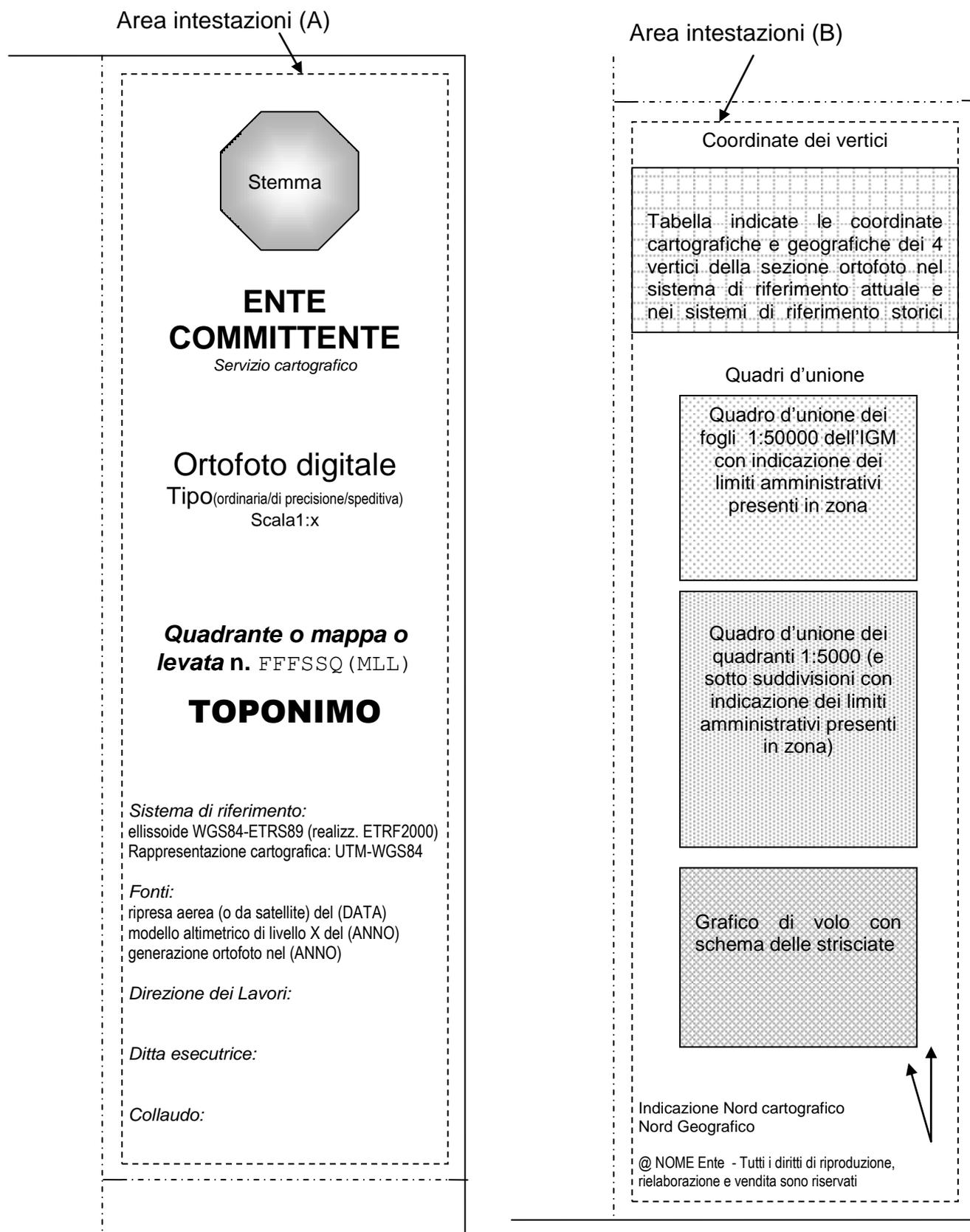


Figura 8 - Un esempio schematico di cornice

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": "TS 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.2.4 per approfondimenti sull'argomento.

II.1.4 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 a grande e grandissima scala corrisponde alla dimensione del *pixel* al suolo (GSD, *Ground Sample Distance*) indicati in Tabella 2.

In base alla tipologia di ortofoto considerata, si possono definire il valore minimo per la risoluzione a cui corrispondono i valori massimi del GSD visibili in Tabella 3.

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

Risoluzione [dpi]	GSD 1:5000 [m]	GSD 1:2000 [m]	GSD 1:1000 [m]	GSD 1:500 [m]
250 (minima)	0.51	0.21	0.11	0.06
450 (massima)	0.28	0.11	0.06	0.03

Tabella 2 - Risoluzione e GSD minimi e massimi per ortofoto digitali a grande e grandissima scala

Tipo di ortofoto	Risoluzione [dpi]	GSD 1:5000 [m]	GSD 1:2000 [m]	GSD 1:1000 [m]	GSD 1:500 [m]
Speditiva (Tipo B) Ordinaria A1	≥ 254	≤ 0.50	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.05
Di precisione A2	≥ 423	≤ 0.30	≤ 0.12	≤ 0.06	≤ 0.03

Tabella 3 - Risoluzione e GSD per ortofoto digitali

I valori di riferimento indicati in tabella sono tra quelli attualmente più in uso per grandi e grandissime scale 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.

II.1.5 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 0 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 0 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*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 0 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.

II.1.6 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 GeoTIFF nella versione *Baseline*. Le specifiche del formato GeoTIFF sono standardizzate nel documento *GeoTIFF format specifications* (paragrafo V.4, riferimento [70]);
2. il formato TIFF 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;
6. i formati BIL (*Band interleaved by line*), BIP (*Band interleaved by pixel*), BSQ (*Band Sequential*).

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 d'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 d'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;
- i dati multispettrali/iperspettrali (con il numero di bande >3) possono essere memorizzati solamente nei formati 1,2,6;
- il formato 6 è un formato binario non compresso dalla struttura molto semplice e compatta, in grado di memorizzare dati multispettrali/iperspettrali, che può essere agilmente da software di visualizzazione e trattamento di dati territoriali (ArcGIS, GRASS, ENVI, GDAL,...).

II.1.7 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.

E' necessario, altresì, indicare anche la data del modello altimetrico utilizzato che condiziona il contenuto metrico dell'ortofoto.

II.1.8 METADATI

Per la strutturazione delle informazioni inerenti i metadati si rinvia a quanto prescritto nel Decreto del 10 novembre 2011 "Regole tecniche per la definizione del contenuto del Repertorio nazionale dei dati territoriali, nonché delle modalità di prima costituzione e di aggiornamento dello stesso".

II.1.9 PRODUZIONE DELLE ORTOFOTO DIGITALI

II.1.9.1 Requisiti delle immagini primarie

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

Date le differenti specificità del processo di acquisizione a seconda che si tratti di immagini aeree o satellitari 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.

II.1.9.2 **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 4 e comunque in grado di garantire le condizioni specificate al paragrafo precedente (GSD massimo).

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

Tabella 4 - 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.

E' 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.

II.1.9.3 **Il modello altimetrico**

Il modello altimetrico utilizzato per la produzione delle ortofoto viene individuato in modo coerente con il documento "Ortoimmagini 10k e modelli altimetrici – Linee guida". Da esso viene derivata (con limitate correzioni) la Tabella 16 (parte III) in cui sono riassunte le caratteristiche dei vari livelli di modello altimetrico.

La Tabella 5 individua il livello caratteristico del modello altimetrico da utilizzare nella produzione di ortofoto a grande scala in funzione della tipologia di ortofoto e delle caratteristiche delle immagini acquisite.

Il livello altimetrico se non specificato nella Tabella 5 deve essere inteso con un DEM. La specifica dei modelli densi (DDEM o DDSM) sono indicati nelle celle apposite della Tabella 5, per la produzione di ortofoto di precisione o ortofoto ordinaria o speditiva in scala 1:500.

Per esempio, una ortofoto alla scala nominale 1:5000 può essere prodotta mediante i seguenti livelli di modello altimetrico:

- livello 6 o superiori per ortofoto di tipo A2 (ortofoto di precisione) con camera dotata di ottica grandangolare;
- livello 6 o superiori per ortofoto di tipo A2 (ortofoto di precisione) con camera dotata di ottica normale;
- livello 4 o superiori per ortofoto di tipo A1 (ortofoto ordinarie per applicazioni cartografiche), prodotte con immagini acquisite da piattaforma aerea con camera dotata di ottica grandangolare;
- livello 3 o superiori per ortofoto di tipo A1 (ortofoto ordinarie per applicazioni cartografiche), prodotte con immagini acquisite da piattaforma aerea in campo normale;
- livello 2 o superiori per ortofoto di tipo A1 (ortofoto ordinarie per applicazioni cartografiche), prodotte con immagini acquisite da piattaforma o satellitare ad altissima risoluzione (GSD di 0.32-0.50 m);
- livello 3 o superiori per ortofoto di tipo B (ortofoto speditive tematiche) prodotte con immagini acquisite da piattaforma aerea dotata di ottica grandangolare;
- livello 2 o superiori per ortofoto di tipo B (ortofoto speditive tematiche) prodotte mediante immagini acquisite da piattaforma aerea in campo normale;
- livello 1 o superiori per ortofoto di tipo B (ortofoto speditive tematiche) prodotte mediante immagini acquisite da piattaforma satellitare ad altissima risoluzione (GSD di 0.32-0.50 m).

Tipo	Piattaforma	1:5000	1:2000	1:1000	1:500
A2	Aerea (ottica grandangolare)	6 (DDSM)	8 (DDSM) (passo 0.20 m)	8 (DDSM) (passo 0.10 m)	9 (DDSM)
A2	Aerea (ottica normale)	6 (DDSM)	7 (DDSM)	7 (DDSM)	8 (DDSM) (passo 0.10 m)
A1	aerea (ottica grandangolare)	4	4	5	8 (DDEM)
A1	aerea (in campo normale)	3	4	4	7 (DDEM)
A1	satellitare ad altissima risoluzione	2	-	-	-
B	Aerea (ottica grandangolare)	3	4	5	7 (DDEM)
B	Aerea (ottica normale)	2	3	4	5
B	satellitare ad altissima risoluzione	1	-	-	-

Tabella 5 - Definizione del livello di modello altimetrico per la produzione di ortofoto a grande scala

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

II.1.9.4 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 dipendono 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_H) indicate in Tabella 6.

In generale i GCP e i CP devono essere determinati mediante adeguate operazioni di rilievo topografico e geodetico sul terreno. Tali tecniche sono ormai essenzialmente svolte con tecniche GPS/GNSS in varie modalità (rilievo rapido-statico, RTK, ecc.) spesso appoggiate a reti di stazioni permanenti. In questo caso, le precisioni ottenibili non permettono determinazioni con accuratezza graduale in funzione dell'applicazione, essendo variabili a passi discreti: dalla precisione metrica o sub-metrica ottenibile con posizionamento in tempo reale e correzioni differenziali trasmesse da satellite (sistemi WAAS come EGNOS, ...) si passa a precisioni centimetriche operando con tecniche RTK e simili, o millimetriche in modalità statica o rapidostatica. Per questo motivo le precisioni stabilite per i punti d'appoggio sono uguali per le varie scale.

Tipo di ortofoto	1:5000		1:2000		1:1000		1:500	
	σ_{EN} [m]	σ_H [m]	σ_{EN} [m]	σ_H [m]	σ_{EN} [m]	σ_H [m]	σ_{EN} [m]	σ_H [m]
Speditiva (Tipo B)	0.40	0.50	0.20	0.20	0.10	0.10	0.05	0.05
Ordinaria (Tipo A) e di precisione	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Tabella 6– L'accuratezza di GCP e CP per l'orientamento delle immagini primarie

Nel caso di applicazioni speditive e/o tematiche (tipo B) per scale minori o uguali a 1:1000, 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 6: tali punti possono essere denominati MCP (*Map Control Point*).

II.1.9.5 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 *pushbroom*, 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 i modelli Rational Polynomial Coefficients (RPC) a coefficienti noti, forniti nei metadati).

Il numero di GCP deve essere tale da garantire il rispetto delle tolleranze stabilite. Il numero di CP deve garantire una efficace verifica delle precisioni ottenute con le operazioni di orientamento.

Gli scarti residui massimi ammissibili (v) sui GCP e sui CP in seguito alle operazioni di orientamento esterno sono riassunti in Tabella 7. Tali valori devono essere soddisfatti per almeno il 95 % dei GCP e dei CP utilizzati.

Tipo di ortofoto	Scala 1:5000				Scala 1:2000				Scala 1:1000				Scala 1:500			
	GCP		CP		GCP		CP		GCP		CP		GCP		CP	
	v_{EN} [m]	v_H [m]														
B	1.50	1.20	2.60	1.05	0.60	0.45	1.05	0.70	0.30	0.25	0.55	0.35	0.20	0.15	0.25	0.18
A1/A2	1.00	0.80	1.75	0.70	0.40	0.30	0.70	0.50	0.20	0.15	0.35	0.25	0.10	0.10	0.17	0.12

Tabella 7 - Scarti residui massimi ammissibili su GCP e CP nella fase di orientamento

La georeferenziazione diretta è permessa solamente per scale minori o uguali a 1:5000. In questo caso qualora si utilizzino esclusivamente tecniche di fotogrammetria diretta (sistemi integrati GNSS-IMU), senza eseguire una procedura di triangolazione aerea, si stabiliscono le precisioni con cui devono essere determinati i parametri di orientamento esterno delle immagini fotogrammetriche:

- le coordinate del centro di presa (E, N, H) dovranno avere una accuratezza (sqm):
 $\sigma_{E,N,H} \leq 0.10$ m;
- i parametri di orientamento dei fotogrammi dovranno avere le accuratezze seguenti:
 $\sigma_{\varphi, \omega} \leq 6$ mgon, $\sigma_k \leq 9$ mgon.

Per verificare la presenza di sistematismi residui, è comunque necessario utilizzare alcuni punti di controllo ben distribuiti nell'ambito del blocco, almeno quattro punti ai bordi del blocco e uno centrale (tolleranze CP).

Per tutte le altre scale, ovvero per le scale maggiori o uguali a 1:2000, è sempre necessario effettuare una procedura di triangolazione aerea. In particolare, qualora si acquisiscano anche le strisciate laterali, è lecito semplificare l'appoggio a terra secondo le regole della triangolazione fotogrammetrica: per blocchi regolari è possibile utilizzare solamente 4 punti d'appoggio tridimensionale nei vertici del blocco e una decina di punti di controllo nelle zone centrali del blocco.

Viste le accuratezze che devono essere raggiunte, per le grandissime scale (1:1000 e 1:500) è consigliabile utilizzare una geometria di punti di appoggio più fitta e un numero di punti di controllo ben distribuiti in tutto il blocco.

Le operazioni di triangolazione fotogrammetrica devono essere pianificate mediante un apposito progetto che deve essere approvato dalla direzione dei lavori sentito il collaudatore.

II.1.9.6 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 può essere scelto tra l'interpolazione bilineare e la "convoluzione bicubica".

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. Tale operazione deve essere svolta in continuo su tutto il blocco in modo da determinare variazioni radiometriche variabili con continuità.

Nella produzione di ortofoto ordinaria o speditiva, 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 l'istituzione 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.

E' 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'abbinamento 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 d'altezza, in modo da garantire le tolleranze indicate in Tabella 1.

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

Nel caso di ortofoto di precisione, è necessario utilizzare più fotogrammi sulla stessa zona in modo da recuperare tutte le informazioni possibili sul territorio rappresentato. In particolare, è necessario:

- per ogni porzione dell'ortofoto scegliere il fotogramma principale da cui estrarre la gran parte delle informazioni radiometriche;
- individuare le zone nascoste dagli edifici e dagli altri oggetti rialzati rispetto al terreno all'interno del fotogramma principale e procedere al loro riempimento, sfruttando i fotogrammi adiacenti che possono contenere immagini della stessa zona acquisite da centri di presa differenti;
- qualora non sia possibile ottenere le informazioni radiometriche sulle zone nascoste da nessun fotogramma, indicare queste parti di ortofoto con un colore predefinito a priori (per esempio bianco puro) che indica assenza di informazione.

Anche in questo caso, lo scostamento tra elementi geometrici corrispondenti estratti da differenti fotogrammi (per esempio a cavallo delle linee di separazione che delimitano le zone nascoste) non deve superare la tolleranza ammessa per l'ortofoto.

II.1.9.7 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 e grandissima scala secondo le indicazioni contenute in II.2.

II.1.10 VERIFICHE DI QUALITÀ

Le modalità di verifica 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 alcuni controlli di qualità interna che permettono una verifica preliminare.

II.1.10.1.1 Verifica dei requisiti delle immagini di partenza

Occorre verificare che le immagini fotogrammetriche acquisite soddisfino le specifiche indicate in II.1.4, II.1.5 e II.1.6.

In particolare occorre verificare che:

- sia garantita la completa copertura monoscopica, stereoscopica singola o multipla (secondo le prescrizioni) dell'area in oggetto;
- le immagini soddisfino i requisiti geometrici contenuti in II.1.4 e in II.1.9.1;
- le immagini abbiano caratteristiche radiometriche sostanzialmente omogenee, siano prive di hotspot e/o di fenomeni di viraggio cromatico significativi e soddisfino i requisiti radiometrici contenuti in II.1.5.

II.1.10.1.2 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;

II.1.10.1.3 Verifica di precisione su punti di appoggio e 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 II.1.9.5.

II.1.10.1.4 Verifica della corrispondenza del modello altimetrico

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

II.1.10.2 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;
- accuratezza: si controlla l'accuratezza 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 l'impiego di punti geodetici esistenti (punti o capisaldifissi).

Questa rete di CP può essere realizzata con tecniche di rilievo diretto (stazione totale, misure GNSS, ...) che garantiscano precisioni di misura aventi accuratezza significativamente migliore (quando possibile, 1 ordine di grandezza) rispetto alle tolleranze fissate T_{EN} (Tabella 1). La verifica si svolge 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;

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 $E_{OP,i}$, $N_{OP,i}$ le coordinate dei punti dell'ortofoto corrispondenti ai punti di controllo, si determina il valore del *circular error* al 95 % di probabilità dell'ortofoto $CE9_{OP}$:

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

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

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

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.

I CP di collaudo possono essere derivati anche da altri dati cartografici qualora disponibili, sufficientemente aggiornati e tali da garantire i 4/5 delle accuratezze planimetriche indicate in Tabella 1.

II.2 PRESCRIZIONI PER LA RIPRESA FOTOGRAMMETRICA

II.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 d'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.

II.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, 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 (*Near InfraRed*).

II.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 e della traiettoria ad elevata densità temporale;
- 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 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.

II.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.

Questo limite vale anche per le camere digitali multisensore: in questo caso la taratura della singola ottica può essere anche meno frequente: ma la verifica della taratura della camera deve essere effettuata entro 1 anno dall'esecuzione del volo mediante poligono di calibrazione e fornire i documenti di tale verifica.

Il sistema di presa deve essere 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 cinederivometro per la correzione della deriva durante il volo. Questi sistemi divengono necessari quando il volo viene effettuato per ortofoto in scala nominale maggiore o uguale a 1:2000.

II.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 Sampling 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 è possibile scegliere la quota relativa di volo e i vari parametri del volo.

Tipo di ortofoto	Risoluz. ortofoto (dpi)	1:5000		1:2000		1:1000		1:500	
		GSD ortofoto (m)	GSD Fotogr. (m)						
Speditiva (Tipo B) Ordinaria A1	>= 254	<= 0.50	<= 0.40	<= 0.20	<= 0.16	<= 0.10	<= 0.08	<= 0.05	<= 0.04
Di precisione A2	>= 423	<= 0.30	<= 0.24	<= 0.12	<= 0.09	<= 0.06	<= 0.05	<= 0.03	<= 0.03

Tabella 8 - Risoluzione e GSD per ortofoto digitali

Il territorio può essere suddiviso in blocchi omogenei costituiti da insiemi di strisciate parallele. Il ricoprimento trasversale delle strisciate deve 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 striscia non dovranno mai superare 5 gon;
- il ricoprimento longitudinale fra fotogrammi di una stessa striscia deve essere compreso fra il 55% e il 80%;
- il ricoprimento trasversale fra fotogrammi consecutivi della stessa striscia non deve essere inferiore al 90%;

- qualora sia prevista l'estrazione del modello altimetrico dai dati fotogrammetrici, è necessario eseguire un volo che soddisfi anche le caratteristiche stabilite in III.3;

Per la produzione di ortofoto di precisione in ambito urbano, al fine di limitare le zone nascoste per motivi prospettici, è consigliabile utilizzare un volo fotogrammetrico a stereoscopia multipla:

- in centri storici o territori fortemente urbanizzati in cui generalmente la larghezza della sede stradale è minore dell'altezza degli edifici adiacenti, è consigliabile ricorrere ad una copertura stereoscopica quadrupla ovvero con almeno 4 modelli stereoscopici possibili per ogni porzione del territorio considerato. In questo caso è necessario ricorrere a un ricoprimento longitudinale compreso fra il 75% e il 90% e un ricoprimento trasversale di norma pari al 60 % e in nessun caso inferiore al 50 %;
- in territori con media densità abitativa caratterizzata da edifici di limitata altezza e larghezza della sede stradale sempre maggiore dell'altezza degli edifici, è possibile ricorrere ad una stereoscopia doppia. In questo caso il ricoprimento longitudinale deve sempre essere compreso fra il 75% e il 90%, ma si può ridurre il ricoprimento trasversale di norma pari al 40 % e in nessun caso inferiore al 35 %.

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%.

Per la produzione di ortofoto di precisione in ambito urbano con camere *push-broom*, al fine di limitare le zone nascoste per motivi prospettici, è consigliabile utilizzare un volo fotogrammetrico a stereoscopia multipla in cui il ricoprimento trasversale sia di norma pari al 60 % e comunque sempre maggiore del 50 %.

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, di fenomeni di *hot-spot* e, per quanto possibile, di copertura nevosa.

II.2.1.5 Epoca dei voli

I voli dovranno essere eseguiti in condizioni di raggi solari con elevazione non inferiore a 30°. Nelle giornate caratterizzate da soleggiamento molto intenso, è necessario prestare molta attenzione ai fenomeni di *hot-spot* (V.2.3).

Secondo Paine e Kiser (2008), la maggior probabilità di ritrovare *hot-spot* nelle immagini acquisite si realizza quando la posizione del sole forma, con la direzione dello zenit, un angolo (*solar altitude*) inferiore alla metà dell'angolo di apertura dell'ottica utilizzata (*Field Of View*). Si può comprendere che questa situazione si realizza spesso con elevazione solare maggiore di 50-60°, ovvero proprio nel periodo a cavallo del mezzogiorno solare consigliato in tutti i moderni capitolati speciali d'appalto per l'esecuzione di voli fotogrammetrici.

Tale situazione deve essere considerata per le varie ottiche che compongono le moderne camere digitali.

E' necessario porre particolare attenzione nella scelta del periodo e dell'ora di volo, anche in funzione della tipologia di vegetazione prevalente.

Nel caso in cui si prevede di utilizzare il volo per la generazione del modello altimetrico, 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.

Se sono presenti limitati effetti di hot-spot è possibile ricorrere a operazioni di pre-processing (Sun M. W, Zhanga J., 2008, Lingua, Maschio, 2010,).

Nel caso in cui le operazioni di pre-processing non permettano un completo recupero della qualità cromatica del volo o i fenomeni di hot-spot risultino troppo frequenti ed evidenti, il volo fotogrammetrico risulta non accettabile e i fotogrammi devono essere riacquisiti.

II.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 adeguata (per esempio alla 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;
- il periodo previsto per il volo nell'arco del giorno.

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 1 o superiore) 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.2.2 UTILIZZO DI TECNICHE DI FOTOGRAMMETRIA DIRETTA

II.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 determinazione 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 PDOP ≤ 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 sqm.

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.

II.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 sqm 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 qui descritto.

Il complesso delle attrezzature fotogrammetriche, camera da presa e sistema GNSS/INS, deve essere sottoposto a calibrazione prima e dopo l'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 sqm.

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.

II.2.2.3 Le stazioni a terra

Nell'eventualità di uso di ricevitori GNSS per la determinazione diretta della posizione dei centri di presa (anche se associata a strumentazione inerziale per ricavare i 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 (per esempio entrambi doppia costellazione e doppia frequenza). Le distanze tra i ricevitori fissi non 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 già

noti nel sistema di riferimento nazionale o determinati in esso mediante la misura di almeno due linee di base che li colleghino ai più vicini vertici noti; 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 o una soluzione di rete GNSS.

II.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;
- “il 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; e verifiche su poligono di taratura;
- se si utilizza strumentazione per la georeferenziazione diretta (GNSS/IMU), i *report* di calibrazione prima e dopo l'esecuzione del volo;
- grafico del volo (in scala adeguata, per es. 1:25.000), in forma digitale con formato da concordare con la Direzione dei Lavori, sentito il Collaudatore, ed eventualmente in forma cartacea a richiesta della Direzione dei Lavori (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) secondo le specifiche “Intesa GIS, National Core” contenenti le informazioni relative ai grafici di volo per l'intero territorio servito:
 - assi di volo
 - centri di presa
 - abbracciamento al suolo di tutti i fotogrammi;
- adeguati supporti (*hard-disk* rimovibili, DVD, ...) contenenti le immagini digitali originali in formato TIFF/LZW.

II.2.4 IL CONTROLLO DI QUALITA'

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.

II.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 o per mezzo della calibrazione su idoneo poligono di volo.

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.

II.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, assenza di fenomeni di hot-spot e di colori innaturali degli elementi ripresi;
- determinazione degli stiramenti della pellicola in alcuni fotogrammi significativi (inizio di una strisciata, inizio di un nuovo rullo di pellicola...) nel caso di camera fotografica;
- 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 e del GSD;
- sovrapposizione longitudinale e trasversale minima ed eventuali lacune nella copertura; data e ora del volo secondo le prescrizioni del capitolato di oneri;
- 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.2.4.2.1 Il collaudo del volo

Nel caso in cui siano state utilizzate camere metriche digitali a prospettiva centrale unica (*frame*), verranno eseguite le verifiche su un campione di immagini non inferiore 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 (*pushbroom*), 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 inferiore al 5% del totale delle mappe oggetto della presa (secondo il taglio standard) .

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

II.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 II.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 PDOP con valori sempre minori di 5;
 - la correttezza del posizionamento: le posizioni devono essere determinate sempre ad ambiguità fissata ad 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) e, quando possibile una eventuale soluzione di rete. 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 (II.1.9.5);
- Le accuratezze delle coordinate dei centri di presa della camera fotogrammetrica stimate in fase di elaborazione devono soddisfare i limiti indicati in II.1.9.5;
- La correttezza dell'applicazione del più recente modello di geoide messo a disposizione dall'IGM (attualmente tramite le griglie GK2 da utilizzare nella procedura Verto) per la determinazione delle quote ortometriche (II.1.1) dei centri di presa.

II.2.4.2.3 La georeferenziazione diretta

Come già indicato in II.1.9.5, la georeferenziazione diretta è permessa solamente per scale minori o uguali a 1:5000. In questo caso, occorre effettuare tutti i controlli prescritti al II.2.4.2.2 con l'unica differenza che alle traiettorie da verificare deve essere aggiunta quella ottenuta dalla compensazione congiunta GNSS-IMU.

E' sempre necessario verificare la presenza di eventuali sistematismi mediante verifica con punti di controllo a terra (CP).

Per tutte le altre scale è sempre necessario svolgere un triangolazione fotogrammetrica (II.1.9.5) anche semplificata per raffinare i parametri di orientamento esterno determinati con GNSS/IMU: la verifica avviene pertanto mediante i *report* della triangolazione fotogrammetrica che devono soddisfare i requisiti descritti in II.1.9.5.

II.3 L'ORTOFOTO SOLIDA

II.3.1 DEFINIZIONE

L'ortofoto solida di precisione sintetizza i pregi dei due prodotti descritti in questo documento: infatti, essa si configura come la fusione del contenuto metrico bidimensionale e cromatico dell'ortofoto con il contenuto tridimensionale di un modello altimetrico denso (DDEM/DDSM) dell'oggetto rappresentato. La necessità di possedere un modello altimetrico denso non costituisce un vero problema, in quanto esso è richiesto per la produzione dell'ortofoto, e quindi già disponibile come sotto prodotto.

In questo contesto, l'ortofoto solida (OS) può essere definita come una ortofoto alla quale viene aggiunta una matrice contenente l'informazione ottenuta dal modello altimetrico, utilizzato per produrla. Sia data un'ortofoto di precisione che per sua natura è correttamente georeferenziata in un sistema di riferimento noto. Si conoscono per esempio:

- Le coordinate (x_0, y_0) nel sistema di riferimento utilizzato del centro del pixel in alto a sinistra dell'immagine, ovvero in posizione (1,1) all'interno della matrice immagine ;
- La dimensione del pixel dell'ortofoto in unità metriche (d).

Ne consegue che l'individuazione di un pixel in posizione (c, r) all'interno della matrice dell'ortofoto permette di determinarne le coordinate planimetriche, secondo la ben nota relazione:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + d * (c - 1) \\ y &= y_0 - d * (r - 1)\end{aligned}\tag{Eq. 1}$$

Sia dato un modello altimetrico denso memorizzato in forma di matrice bidimensionale $H(i, j)$ e avente passo della griglia pari alla dimensione del pixel dell'ortofoto in unità metriche (d), dimensioni uguali al numero di righe e di colonne dell'ortofoto e posizione dei nodi coincidente con i centri dei pixel dell'ortofoto associata. Ne consegue che individuare un pixel in posizione (c, r) all'interno dell'ortofoto permette di estrarre una quota $H(c, r)$ nella stessa posizione. E', pertanto, è possibile determinare anche la terza dimensione aggiungendo alla un'equazione molto semplice, ottenendo le relazioni fondamentali dell'ortofoto solida Eq.2:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + d * (c - 1) \\ y &= y_0 - d * (r - 1) \\ z &= H(c, r)\end{aligned}\tag{Eq. 2}$$

La figura 1 espone in forma grafica il principio dell'OS.

Si sottolinea che:

- la matrice immagine e la matrice delle quote devono avere lo stesso numero di pixel;
- la quota memorizzata all'interno del modello altimetrico deve corrispondere alla quota del centro del pixel dell'ortofoto.

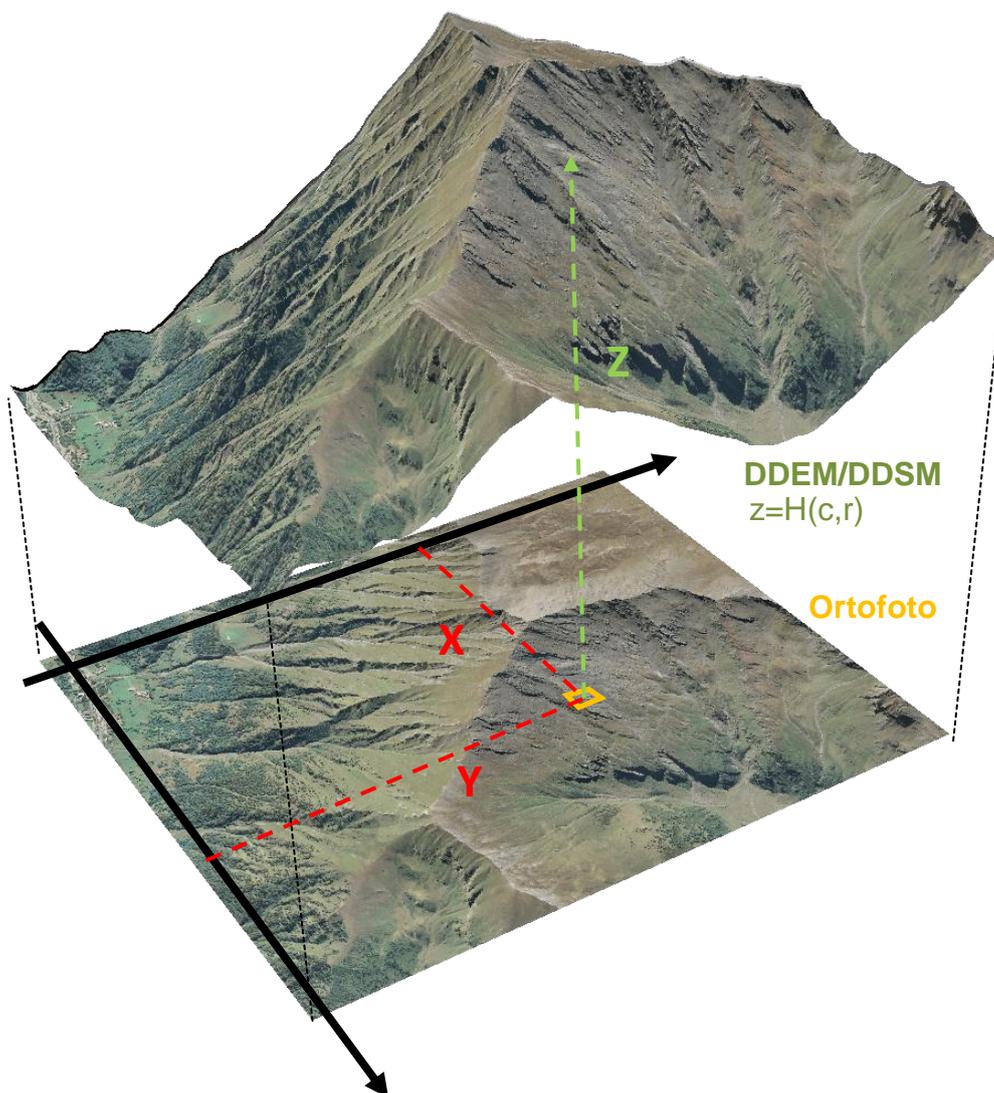


Figura 9 - Lo schema di una ortofoto solida

II.3.1.1 Tipologie

L'ortofoto solida eredita le tipologie di ortofoto descritte nel II.1 e definite in modo più approfondito in V.1.2. Pertanto, è possibile definire le seguenti tipologie per l'ortofoto solida:

- Tipo A: ortofoto solida orientata ad applicazioni prevalentemente cartografiche, distinte nei sottotipi:
 - A1: ortofoto solida ordinaria (OSO);
 - A2: ortofoto solida di precisione (OSP);
- Tipo B: ortofoto solida speditiva (OSS) 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. In questa parte del documento si analizzano le linee guida legate alle ortofoto ordinarie alla scala nominale grande (1:5000, 1:2000) e grandissima (1:1000, 1:500).

II.3.2 SPECIFICHE TECNICHE GENERALI

Gran parte delle specifiche tecniche generali dell'ortofoto solida coincidono con quelle relative ai dati di partenza, ovvero legate all'ortofoto e ai modelli altimetrici. In particolare, si ereditano le seguenti caratteristiche:

- Il sistema di riferimento (II.1.1);
- Il taglio dei fogli (II.1.2);
- La tolleranza planimetrica (II.1.3);
- La risoluzione geometrica (II.1.4);
- La risoluzione radiometrica (II.1.5);
- La precisione altimetrica (III.1.9).

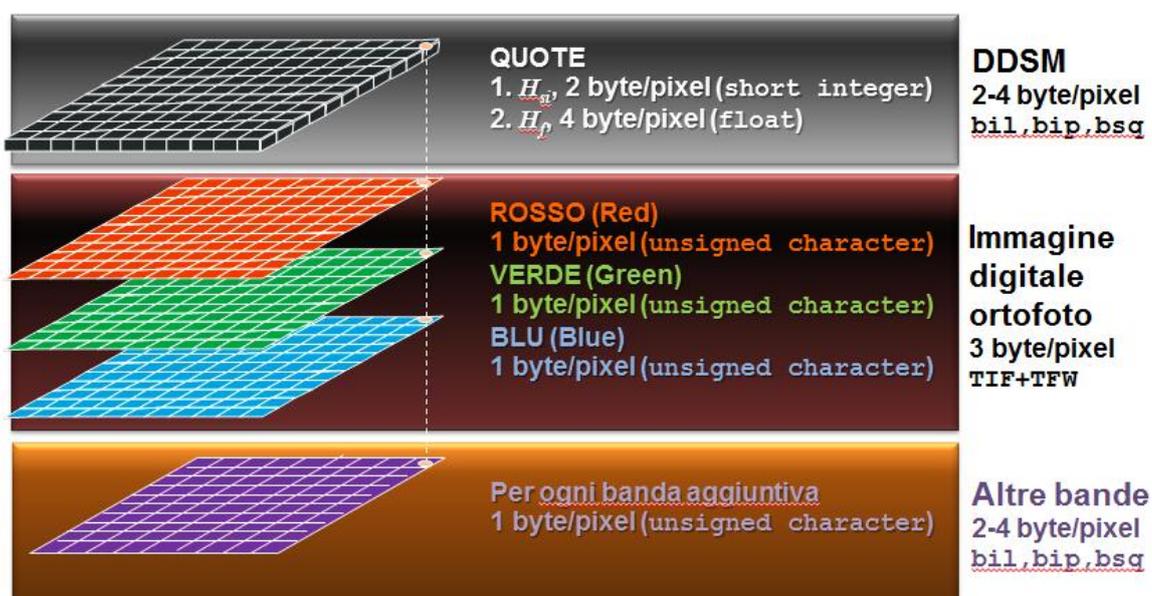
La risoluzione geometrica viene ereditata dall'ortofoto in quanto il pixel dell'ortoimmagine è, in genere, più piccolo della maglia del modello altimetrico.

II.3.2.1 La struttura di base dell'ortofoto solida

L'ortofoto solida di base nasce dalla tradizionale struttura di una ortofoto secondo matrici RGB delle immagini digitali che è facilmente integrabile attraverso l'aggiunta di una nuova matrice nella quale sono inserite le informazioni delle quote.

Pertanto, per ogni pixel di una OS, è necessario memorizzare (Figura 10):

- i 3 valori di intensità delle componenti cromatiche fondamentali (RGB, Red, Green, Blue) con 1 byte ciascuna (`unsigned character` nella notazione ANSI C) secondo gli standard sulle immagini digitali in colori veri per un totale di 3 byte;
- un valore di quota derivato dal DDEM/DDSM espresso in forma numerica.



• Figura 10 - La struttura di base dell'OSP

Il valore della quota può essere memorizzato secondo due tipi differenti di dato.

Per limitare l'occupazione di memoria, si può utilizzare un intero corto (H_{si} , 2 byte, `short integer` nella notazione ANSI C) che permette di memorizzare numeri interi compresi nell'intervallo (-32768,+32768). Per determinate quote ortometriche reali con il dettaglio necessario alle grandi e grandissime scale è necessario individuare:

- un valore di (Grande) Traslazione (H_{GT}) delle quote memorizzate prossimo al baricentro nel modello altimetrico nel foglio considerato;
- un fattore di moltiplicazione che definisce la scala (H_{scala}) con cui sono memorizzate le quote H_{si} : $H_{scala}=10^{-n}$ con n pari al numero di cifre decimali necessarie per esprimere la quota reale. Per esempio, se le quote hanno precisione metrica, il numero di cifre decimali è 0, quindi $H_{scala} = 1$, se le quote hanno precisione decimetrica, il numero di cifre decimali è 1, quindi $H_{scala} = 10^{-1}=0.1$, se le quote hanno precisione centimetrica, il numero di cifre decimali è 2, quindi $H_{scala} = 10^{-2}=0.01$, e così via.

La quota reale (H) si può, quindi, determinare mediante la Eq. 3:

$$H = H_{GT} + H_{scala} * H_{si} \tag{Eq. 3}$$

E' necessario fare attenzione ai limiti numerici di H_{si} che determinano gli estremi dell'intervallo di variabilità delle quote reali che possono essere rappresentate, indicate in Tabella 9. In questo caso, l'occupazione di memoria dell'OS rispetto alla dimensione dell'ortofoto cresce solamente di circa il 66 % (2/3).

N. Cifre decimali	H_{scala}	Limiti di $H_{scala} * H_{si}$	Limiti di H
0	1	(-32768,+32768)	($H_{GT} -32768, H_{GT} +32768$)
1	0.1	(-3276.8,+3276.8)	($H_{GT} -3276.8, H_{GT} +3276.8$)
2	0.01	(-327.68,+327.68)	($H_{GT} -327.68, H_{GT} +327.68$)
3	0.001	(-32.768,+32.768)	($H_{GT} -32.768, H_{GT} +32.768$)

Tabella 9 - I limiti numerici nell'utilizzo di H_{si}

Se le quote da memorizzare all'interno del singolo foglio dell'OS eccedono i limiti indicati, è necessario utilizzare numeri in virgola mobile a singola precisione (4 byte, `float` nella notazione ANSI C). In questo caso, è possibile memorizzare all'interno della mantissa oltre 7 cifre significative che permettono così di rappresentare, con dettaglio millimetrico quote comprese nell'intervallo (-9999.999,9999.999), ovvero tutte le quote possibili sulla superficie terrestre: non è più necessario ricorrere a traslazioni ($H_{GT}=0.000m$) o scala ($H_{scala} = 1$).

II.3.2.2 Il formato dei dati digitali dell'ortofoto solida

L'OS è un tipo di prodotto abbastanza recente e non esistono ancora regole internazionali consolidate che ne definiscano formati standard. La soluzione consigliata non è rivolta pertanto alla definizione di un nuovo formato, ma utilizza una soluzione più semplice, risolvendo il problema della memorizzazione dei dati dell'ortofoto solida ereditando i formati utilizzati per le due parti componenti:

- L'ortofoto viene memorizzata mediante i formati descritti in II.1.6 con i relativi metadati. Per semplicità si consiglia di ricorrere al formato immagine digitale georeferenziata mediante file world (TIF+TFW, BMP+BPW, JPG+JGW);

- Il modello altimetrico viene registrato secondo i formati descritti in III.1.6 con i relativi metadati. Per ottenere una memorizzazione compatta, si consiglia di utilizzare il formato BIL/BIP/BSQ che permette di registrare, in forma binaria, le quote del modello altimetrico sia come intero corto (s_i , 2 byte) sia come numero in virgola mobile (float, 4 byte).

Le modalità di georeferenziazione dell'OS si derivano dalle relative informazioni che possono essere contenute sia nel file dell'ortofoto che nel file del modello digitale. E' bene che, quando possibile, queste informazioni siano congruenti tra i due file, nel caso di differenza hanno comunque la precedenza quelle contenute nel file dell'ortofoto.

A questi dati è necessario associare un file di sintesi (estensione .OS) di tipo testuale (ASCII) che contiene i nomi dei file dell'ortofoto e del modello altimetrico e definisce le caratteristiche principali dell'OS.

La sua struttura è indicata in Tabella 10.

Riga	campi	Descrizione	Valori d'esempio
1	Descrizione OS	Stringa max 80 caratteri	Ortofoto solida Regione Piemonte
2	tipologia	3 caratteri indicanti il tipo di ortofoto solida: ordinaria (OSO), di precisione (OSP) o speditiva (OSS)	OSO OSS OSP
3	File ortofoto	Stringa	Sezione_127050.bmp
4	File georeferenziazione	Stringa contenente File TFW, JGW, BPW	Sezione_127050.bpw
5	File modello altimetrico	Stringa contenente il nome del file del modello altimetrico	Sezione_127050.bil
6	H_{GT}, H_{scala}	Traslazione e scala utilizzati per la memorizzazione delle quote. Sono indicati mediante 2 numeri separati dalla virgola	Quote in si: 1000.000,0.01 Quote in float: (sempre) 0.000,1.000
7	Numero estensioni	Numero dei file contenenti informazioni aggiuntive estese che completano le informazioni territoriali con altri dati (per es. multispettrali, termici, ecc.). Pari a 0 se non sono presenti file di estensione.	0 (non ci sono estensioni) 1 (una estensione) 2 (due estensioni) ...

Tabella 10 - Il file di sintesi dell'OS

Un esempio del file di sintesi può essere:

```
Ortofoto solida della Regione Piemonte in scala 1:5000
OSO
orto_157050.bmp
orto_157050.bpw
ddem_157050_50cm.bil
500.000, 0.1
0
```

II.3.2.3 La struttura estesa dell'ortofoto solida

L'ortofoto solida deve essere in grado di memorizzare anche altri dati.

E' possibile inserire un eventuale modello altimetrico aggiuntivo per completare le informazioni 3D: per esempio si può inserire un DSM qualora il modello altimetrico principale sia un DEM). Si consiglia anche in questo caso di utilizzare il formato BIL/BIP/BSQ come descritto nel paragrafo precedente.

All'interno dell'ortofoto solida, si possono anche memorizzare informazioni multi/iperspettrali. Queste informazioni sono contenute in file tipo BIL/BIP/BSQ, anche unici, o separati secondo la struttura voluta. Si consiglia di registrare negli appositi file HDR, il significato delle varie bande memorizzate.

Secondo le stesse modalità, è possibile memorizzare anche dati termici (temperatura) e in generale qualunque altro dato raster.

In Tabella 11, è contenuta una descrizione delle righe da aggiungere al file di sintesi (.os) per descrivere i dati aggiuntivi di estensione dell'ortofoto solida.

riga	Campi	Descrizione	Valori d'esempio
8+[2*(i-1)]	File estensione	Stringa contenente il nome dell' i-esimo file di estensione	infrarosso_127050.bsq
9+[2*(i-1)]	H_{GT}, H_{scala}	Traslazione e scala utilizzati per la memorizzazione dei valori. Sono indicati mediante 2 numeri separati dalla virgola	Per le quote vedi la riga 6 della Tabella 10. In genere per altri dati radiometrici (1 byte/banda): 0.000,1.000

Tabella 11 - Le informazioni contenute nel file di sintesi dell'OS per i dati estesi

Un esempio del file di sintesi può essere:

```
Ortofoto solida della Regione Piemonte in scala 1:5000
OSO
orto_157050.bmp
orto_157050.bpw
ddem_157050_50cm.bil
500.000, 0.1
2
ddsm_157050_50cm.bil
500.000, 0.1
orto_infrarosso_157050.bsq
0.000, 1.000
```

II.3.2.4 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.

II.3.2.5 Metadati

Per la strutturazione delle informazioni inerenti i metadati si rinvia a quanto prescritto nel Decreto del 10 novembre 2011 "Regole tecniche per la definizione del contenuto del Repertorio nazionale dei dati territoriali, nonché delle modalità di prima costituzione e di aggiornamento dello stesso".

È possibile ereditare i metadati delle informazioni componenti, ovvero per l'ortofoto si usano i metadati dell'ortofoto, per i modelli altimetrici i metadati specifici ecc.

II.3.3 PRODUZIONE DELL'ORTOFOTO SOLIDA

L'ortofoto solida consiste semplicemente in una riorganizzazione di dati già disponibili. In genere, la sua produzione richiede solamente la raccolta ordinata delle varie informazioni (ortofoto, modello altimetrico, estensioni) e la compilazione del file di sintesi (.os).

Le principali operazioni di elaborazione che sono necessarie in alcuni casi riguardano quasi esclusivamente i modelli altimetrici.

Qualora il modello altimetrico utilizzato per la produzione dell'ortofoto non abbia dimensione della maglia coincidente con quella dell'ortofoto, è necessario generare un nuovo modello altimetrico che contenga per ogni pixel dell'ortofoto la relativa quota; a questo scopo si utilizzano le tecniche di interpolazione tipiche dei modelli altimetrici tipo DEM. Se il modello altimetrico è un DSM occorre procedere a una interpolazione più raffinata per evitare di sporcare i bordi delle discontinuità presenti sulla superficie del territorio (edifici, viadotti, ponti, ecc.): in questo caso è bene utilizzare funzioni interpolanti robuste (mediana, ecc.) o funzioni spline bicubiche che permettono di limitare questo problema.

Il modello altimetrico può anche essere convertito in un formato di memorizzazione binario più compatto (tipo BIL/BIP/BSQ) sfruttando le considerazioni svolte in II.3.2.1.

II.3.4 VERIFICHE DI QUALITÀ

II.3.4.1 Le verifiche di qualità interna

II.3.4.1.1 Verifica dei requisiti dell'ortofoto

Le procedure di produzione dell'ortofoto devono essere verificate attraverso i relativi metadati.

II.3.4.1.2 Verifica dei requisiti del modello altimetrico

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

II.3.4.1.3 Verifica della coerenza tra le informazioni memorizzate nei vari file

Le informazioni memorizzate nei vari file che compongono una ortofoto solida devono essere coerenti. In particolare, occorre verificare che:

- il numero di pixel (numero di righe e numero di colonne) dei vari dati raster siano coincidenti;
- le informazioni di georeferenziazione qualora duplicate nei vari file siano tra loro coerenti.

II.3.4.2 Le verifiche di qualità sul prodotto finale

Sul prodotto finale si devono eseguire sostanzialmente le verifiche di:

- completezza: si valuta che le ortofoto solide 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 e tra loro congruenti;
- accuratezza: si controlla l'accuratezza del contenuto dell'ortofoto solida.

Occorre tener presente che, generalmente, i dati intermedi hanno già subito una verifica di accuratezza secondo le linee guida definite in II.1.10 (ortofoto) e III.1.10 (modello altimetrico). In questo caso, le verifiche di accuratezza sul prodotto finale non devono essere ripetute, e devono essere solamente svolte le verifiche di qualità di completezza e contenuto.

Al contrario, qualora i dati intermedi (ortofoto e modello altimetrico) non siano ancora stati verificati, è necessario procedere ad una specifica verifica di qualità dell'ortofoto solida.

In questo caso, la verifica di accuratezza può essere svolta in base a punti di controllo (CP) tridimensionali, ovvero con le tre coordinate (E, N, Q) note. Questa rete di CP può essere realizzata con tecniche di rilievo diretto (stazione totale, misure GNSS, ...) che garantiscano precisioni di misura aventi accuratezza significativamente migliore (quando possibile, 1 ordine di grandezza) rispetto alle tolleranze fissate.

La verifica di accuratezza si svolge separando:

- la componente planimetrica (E, N) legata all'ortofoto e alle altre componenti radiometriche, la cui verifica segue la procedura già indicata in II.1.10.2;
- la componente altimetrica (Q) legata al modello altimetrico, la cui verifica segue la procedura indicata in III.1.10.2.

III MODELLI ALTIMETRICI A GRANDE SCALA

III.1 SPECIFICHE TECNICHE GENERALI

I contenuti del presente capitolo sono allineati con il già citato documento “Ortoimmagini 10k e DTM”. A questo sono state aggiunte specifiche per la grande e grandissima scala.

Per permettere la leggibilità si sono riportati anche i dettagli generali.

III.1.1 FUNZIONE DEI MODELLI ALTIMETRICI

Per definizione un modello altimetrico è un insieme di dati che permette il calcolo, per interpolazione, della quota (generalmente ortometrica, ovvero riferita al geode assunto come riferimento) di un punto arbitrario del terreno (o della superficie) che viene descritto con una accuratezza assegnata.

I modelli altimetrici rappresentano, nei confronti delle tradizionali curve di livello, un'alternativa alla descrizione dell'altimetria del terreno, che presenta vantaggi e svantaggi. E' 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 rappresenta graficamente 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 della morfologia 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 opportuni *software*.

Esistono numerosi *software* in grado di trasformare un tipo di rappresentazione nell'altro, con inevitabile decadimento di accuratezza 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.

III.1.2 TIPOLOGIE PRINCIPALI E CONTENUTI

Come descritto nel glossario (capitolo V: Tipologie, glossario, acronimi) e visibile in Figura 11, 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), sebbene questi ultimi contengano generalmente, oltre alle informazioni altimetriche, altre informazioni in formato vettoriale utili per descrivere più dettagliatamente la morfologia del terreno;
- 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;

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

1. un *seminato di punti*, disposti in modo regolare o irregolare, in corrispondenza dei quali sia nota la quota;
2. le *linee caratteristiche* del terreno (DTM), degli edifici e della superficie descritta (DSM) rappresentano linee di rottura (o 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, gli specchi d'acqua e quant'altro;
4. le delimitazioni di aree non incluse nei modelli altimetrici, le cosiddette "*zone morte*";
5. *i limiti* dell'area rappresentata.

DEM —●—●—●—
DSM ...○...○...○...

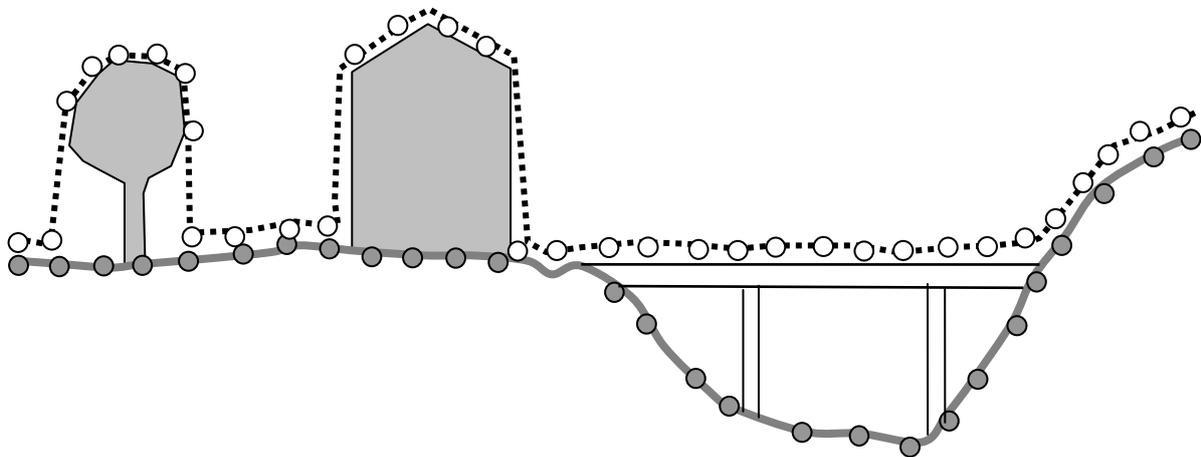


Figura 11 - DEM e DSM

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 rispetto a prefissati standard di accuratezza, 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), che in questo caso coincide con il 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.

III.1.3 DAL SEMINATO DI PUNTI AI MODELLI DELLA SUPERFICIE

La descrizione del terreno (o del terreno e di tutto ciò che lo sovrasta) può essere data mediante un semplice seminato o nuvola di punti, ovvero un insieme di punti noti nelle 3 coordinate senza alcuna ipotesi né informazione circa le caratteristiche della superficie tra un punto e l'altro, ovvero senza alcuna regola predefinita di interpretazione del dato altimetrico. In alternativa il seminato di punti può essere fornito congiuntamente alle informazioni del modello da utilizzare per la descrizione "continua" del terreno. Tra questi possiamo distinguere i modelli caratterizzati da una distribuzione irregolare o regolare di informazioni altimetriche. Le informazioni di altezza possono quindi essere distribuite:

- Secondo un modello *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 12). Si presuppone la realizzazione di una operazione di triangolazione spesso eseguita mediante l'algoritmo di Delaunay, secondo il quale la circonferenza circoscritta ad ogni triangolo non deve contenere nessun altro punto; l'algoritmo di Delaunay ammette una sola soluzione. In generale è necessario ricordare 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 lati dei 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;

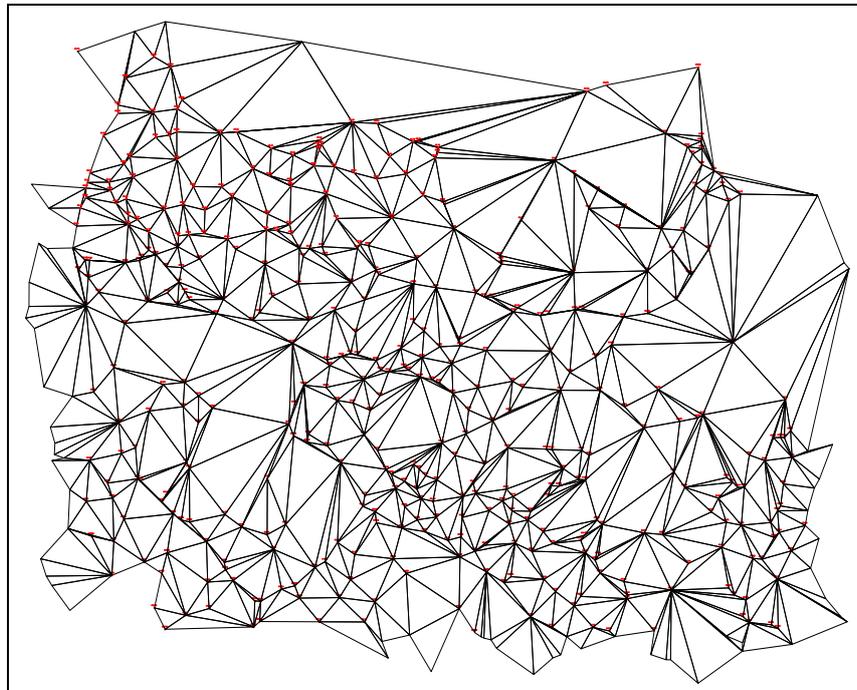


Figura 12 - Un esempio di TIN visto in planimetria

- Secondo una disposizione regolare (vedi Figura 13), 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.

III.1.4 SISTEMI DI RIFERIMENTO E DI COORDINATE

Nella produzione dei modelli altimetrici si prevede l'utilizzo dei sistemi di riferimento e di coordinate definiti in base a:

- il sistema geodetico (*datum*) ETRS89 nella sua realizzazione ETRF2000 (epoca 2008.0) materializzato dalla Rete Dinamica Nazionale (RDN) (coordinate geodetiche Latitudine, Longitudine, Altezza ellissoidica riferite all'Ellissoide WGS84);
- il geode come superficie di riferimento delle quote (ortometriche);
- la rappresentazione cartografica conforme UTM (coordinate cartografiche Est, Nord UTMWGS84 ETRF2000).

Il legame tra quote ellissoidiche e quote ortometriche è definito dal modello di geode (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 - Gauss-Boaga, ED1950 - UTM-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 e formato GK2).

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 accuratezza entro i limiti indicati di tolleranza.

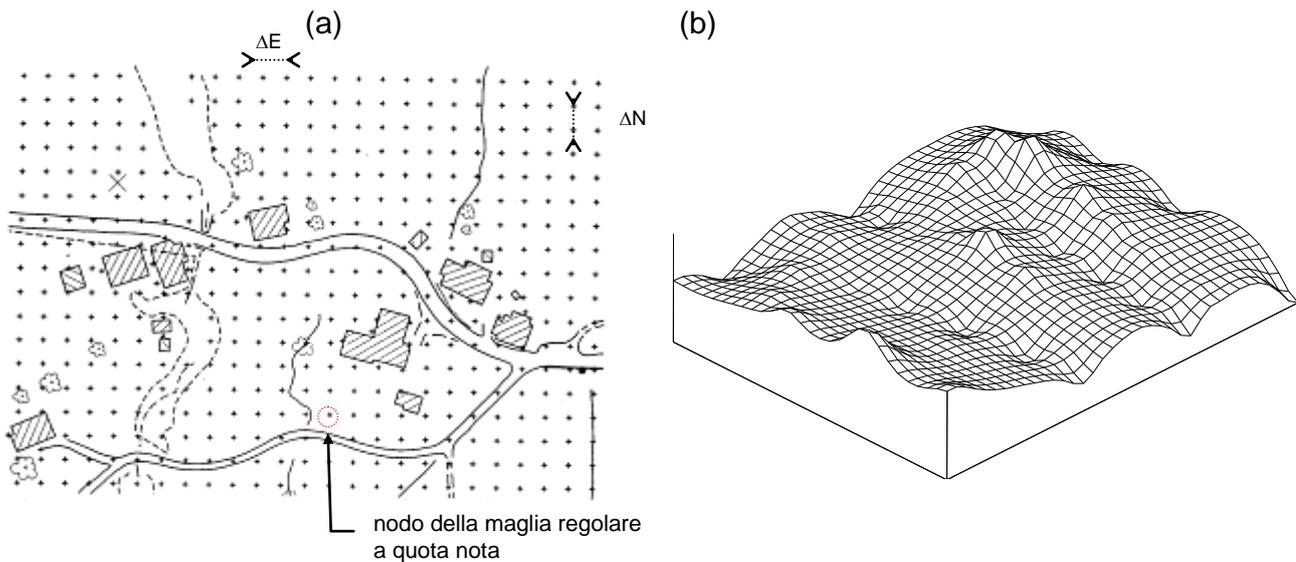


Figura 13 - I modelli altimetrici a disposizione regolare (a) vista in planimetria, (b) vista assometrica

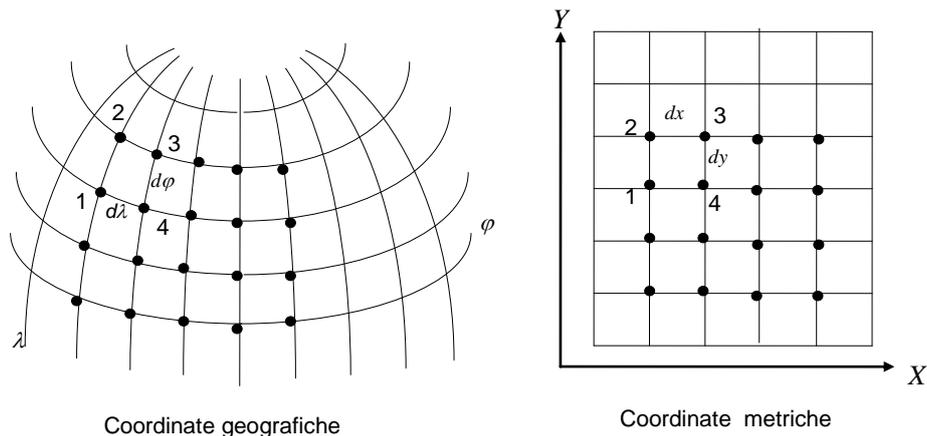


Figura 14 - I grigliati regolari in coordinate geografiche e in coordinate metriche

Per ulteriori dettagli sul sistema di riferimento nazionale si rimanda ai risultati del progetto di ricerca “Lotto 1: Reti geodetiche” del Centro Interregionale di Coordinamento e Documentazione per le Informazioni Territoriali e alle specifiche di implementazione del nuovo sistema di riferimento nazionale sul sito web dell'Istituto Geografico Militare (87.30.244.175/rdn.php).

Un modello altimetrico a maglia regolare può essere costruito utilizzando un grigliato “metrico” (generalmente in coordinate cartografiche) o un grigliato “geografico” (in coordinate geografiche) (vedi Figura 14).

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 (caso molto raro per applicazioni a grande e grandissima scala), 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 nazionale, continentale o globale. 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 metrica omogenea: non possono infatti essere garantite contemporaneamente l'omogeneità nel campionamento metrico e nel campionamento geografico.

III.1.5 REQUISITI DI QUALITÀ DEI MODELLI ALTIMETRICI

III.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 prevede spesso 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 accuratezza 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 per la definizione del passo della griglia sono basati su studi di Ackermann riadattati in una pubblicazione della European Organization for Experimental Photogrammetric Research (A. Flotron e O. Kölbl: *Precision Terrain Models for Civil Engineering*, OEEPE Publication, P 32-134, December 2000). In Tabella 12, che sintetizza i risultati ottenuti negli studi menzionati, sono riportate le indicazioni sulla distanza di griglia in funzione del tipo di terreno (piano, ondulato, accidentato) e della accuratezza desiderata.

Tenuto conto della Tabella 12 e considerando cautelativamente il terreno accidentato, in funzione del livello di accuratezza dei modelli altimetrici, è possibile adottare, i seguenti passi di griglia:

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

Nel caso di modelli altimetrici densi, viene meno il legame tra accuratezza 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 accuratezza planimetrica della scala di rappresentazione nominale associata, come indicato in Tabella 13.

Accuratezza 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)
2	41	26	15
0.8	20	13	7
0.4	13	8	5
0.2	8	5	3

Tabella 12 - Spaziatura della griglia del DTM secondo studio OEEPE

Scala di rappresentazione	Precisione grafica (mm)	Precisione planimetrica (m)	Spaziatura della griglia (m)
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 13 - La spaziatura della griglia per i modelli altimetrici densi

Semplificando la Tabella 13 in funzione delle attuali tecniche di generazione, è possibile adottare le seguenti spaziature della griglia nei modelli altimetrici densi:

- scala 1:5000: passo della griglia ≤ 1 m;
- scala 1:2000: passo della griglia ≤ 0.50 m;
- scale 1:1000: passo della griglia ≤ 0.20 m

- scala 1:500: passo della griglia ≤ 0.10 m.

III.1.5.2 Accuratezza 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 quella delle misure effettuate nelle reti di tipo geodetico. I valori di riferimento per operazioni di controllo di qualità sono in genere quelli dei caposaldi delle reti altimetriche di inquadramento geodetico, la cui precisione è normalmente di alcuni millimetri.

Misure di alta precisione con strumentazione geodetica e rilievi GPS in modalità RTK 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.

Gli errori sistematici (bias), che rappresentano essenzialmente errori nel sistema di riferimento del modello, devono essere eliminati durante la sua realizzazione mediante calibrazione su *Ground Control Point* (GCP) aventi accuratezza certamente superiore a quella presunta per il modello medesimo.

E' necessario individuare (secondo modalità analoghe a quelle indicate per le verifiche al paragrafo II.1.10.2) in campo aperto e, possibilmente, in corrispondenza di variazioni significative di pendenza, il più possibile distribuiti omogeneamente su tutta la zona coperta dal modello e calibrare su di essi il modello stesso.

La calibrazione, intesa come rimozione degli eventuali errori sistematici, è tradizionalmente stata effettuata stimando e rimuovendo la differenza altimetrica media (bias altimetrico) tra quote modello e quote dei GCP, con procedura di 2.5D (traslazione in quota) possibile con numerosi software commerciali; poiché tale procedura non considera però i possibili bias tridimensionali, sarebbe corretto effettuale la calibrazione stimando e rimuovendo anche le differenze planimetriche medie (bias planimetrico) in una procedura completamente 3D (traslazione 3D o rototraslazione spaziale), per ora possibile solo con software scientifico (Brovelli et al, 2009; Brovelli et al, 2010).

Dopo aver effettuato la calibrazione e aver rimosso i bias, l'accuratezza del modello dipende unicamente dai suoi errori accidentali e può essere valutata per mezzo della deviazione standard (σ), che in questo caso coincide con l'errore quadratico medio (RMSE)(vedi capitolo V). L'accuratezza dei modelli altimetrici viene espressa in funzione della scala nominale della corrispondente cartografia numerica. In particolare si possono estendere le accuratezze consigliate (σ) dalla Commissione Geodetica Italiana esprimendo le relative tolleranze $T_H=2\sigma_H$ e $T_{EN}=1.7308\sigma_{EN}$ dove σ_H è lo scarto quadratico medio relativo alla componente altimetrica 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 $T_{H(a)}$;
- la quota dei punti del modello altimetrico e delle linee caratteristiche (*breakline*, contorno di zone morte ecc.) in presenza di alberatura folta (copertura arborea > 70%): 0.30 mm alla scala della carta a cui corrisponde una tolleranza definita $T_{H(b)}$;
- la quota dei punti del modello di descrizione degli edifici: 0.2 mm alla scala della carta a cui corrisponde una tolleranza definita $T_{H(c)}$;

- d. 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 14 sono riassunti i valori di precisione e tolleranza in ambito altimetrico (a, b, c), in Tabella 15 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)	$P_{H(a)}$ (σ_H) (m)	$T_{H(a)}$ ($2\sigma_H$) (m)	Precis. grafica (mm)	$P_{H(b)}$ (σ_H) (m)	$T_{H(b)}$ ($2\sigma_H$) (m)	Precis. grafica (mm)	$P_{H(c)}$ (σ_H) (m)	$T_{H(c)}$ ($2\sigma_H$) (m)
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 14 – Precisioni e tolleranze in altimetria

Scala nominale	Planimetria (d)		
	Precisione grafica (mm)	P_{EN} (σ_{EN}) (m)	T_{EN} ($1.7308 \sigma_{EN}$) (m)
1:5000	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 15 - Precisioni e tolleranze in planimetria per i modelli altimetrici

I valori $T_{H(a)}, T_{H(b)}, T_{H(c)}$ ($2\sigma_H$) sono corrispondenti a un livello di probabilità pari al 95.44% nel caso di distribuzione normale monodimensionale e possono essere sostanzialmente considerati coincidenti con il valore $LE95 = 1.96 \sigma$ (*Linear Error* al 95% di probabilità; per la definizione si veda il V.2.4) indicato nelle normative mondiali standard “ISO/TC 211”: “TS 19138 - *Geographic information - Data quality measures*” - N 2029 del 5 giugno 2006 (211n2029) come indice di qualità di variabili monodimensionali.

Il valore $T_{EN} = 1.7308 \sigma_{EN}$ corrisponde al valore *CE95* (*Circular Error* al 95% di probabilità; per la definizione si veda il paragrafo V.2.4) indicato nelle normative mondiali precedentemente citate come indice di qualità di variabili bidimensionali. Tale valore indica il raggio del cerchio centrato nella posizione planimetrica vera (teorica) che contiene le posizioni stimate con il 95% di probabilità.

III.1.5.3 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:

- a. 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*;

- b. i corsi dei fiumi comprensivi sia degli argini che delle sponde;
- c. 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 del terreno (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;
- g. le linee di costa relative ai laghi: la quota dei laghi, naturali e artificiali, deve essere la stessa per tutto l'invaso;
- h. i crinali e le vette;
- i. i calanchi;
- j. linee di fondo valle, in particolare quando non sono presenti corsi d'acqua;
- k. delimitazioni di colture, dove esiste un cambiamento di pendenza;
- l. particolari forme del terreno difficilmente ricostruibili con soli punti quotati (come conoidi o selle);
- m. profili altimetrici che indicano un cambiamento di segno della pendenza del terreno (linee evidenti di compluvio e di impluvio);
- n. 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'edificato.

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

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

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

III.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

III.1.6.1 Metadati

I metadati devono essere strutturati secondo quanto stabilito dal Decreto del 10 novembre 2011 "Regole tecniche per la definizione del contenuto del Repertorio nazionale dei dati territoriali, nonché delle modalità di prima costituzione e di aggiornamento dello stesso".

III.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 con valori lineari (m) o angolari (°,xxxx per angoli sessadecimali o ° ' " 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 delle 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 ...
...
    
```

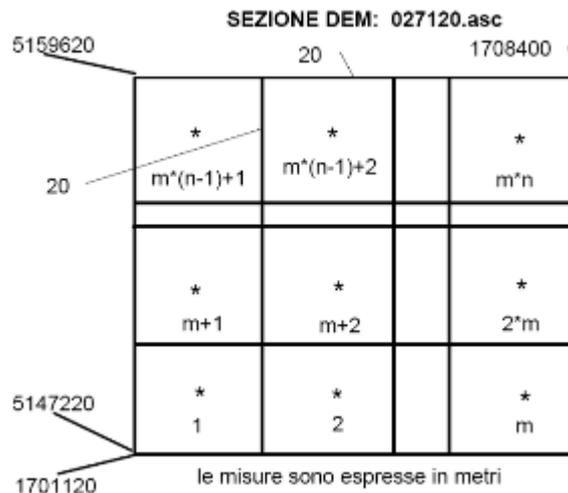


Figura 15 - Un esempio di file in formato GRID ASCII

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 massima e (Est) del grigliato (`east: e`);
4. ascissaminima w (Ovest) del grigliato (`west: w`);
5. numero di righe $nrows$ (`rows: nrows`);
6. numero di colonne $ncols$ (`cols: ncols`);

Segue la matrice delle $NROWS \times NCOLS$ 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 16 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 16 - Il formato GRASS ASCII GRID

In aggiunta al formato GRID-ASCII i dati possono essere forniti come semplici file testuali contenenti in ogni riga i valori N , E , H (quota ortometrica) o φ , λ , H (quota ortometrica) corrispondenti ad ogni nodo della griglia.

I modelli altimetrici si possono anche memorizzare in un modo molto compatto nei formati BIL/BIP/BSQ (V.2.10.3) leggibili dalla gran parte dei software che si occupano di visualizzazione e trattamento di dati digitali territoriali.

III.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 il 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 (E st e N ord 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 6) 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 17, in cui i bordi del foglio di mappa considerato risultano generalmente ruotati rispetto alle direzione del grigliato regolare del modello altimetrico (secondo coordinate Est e Nord costanti).

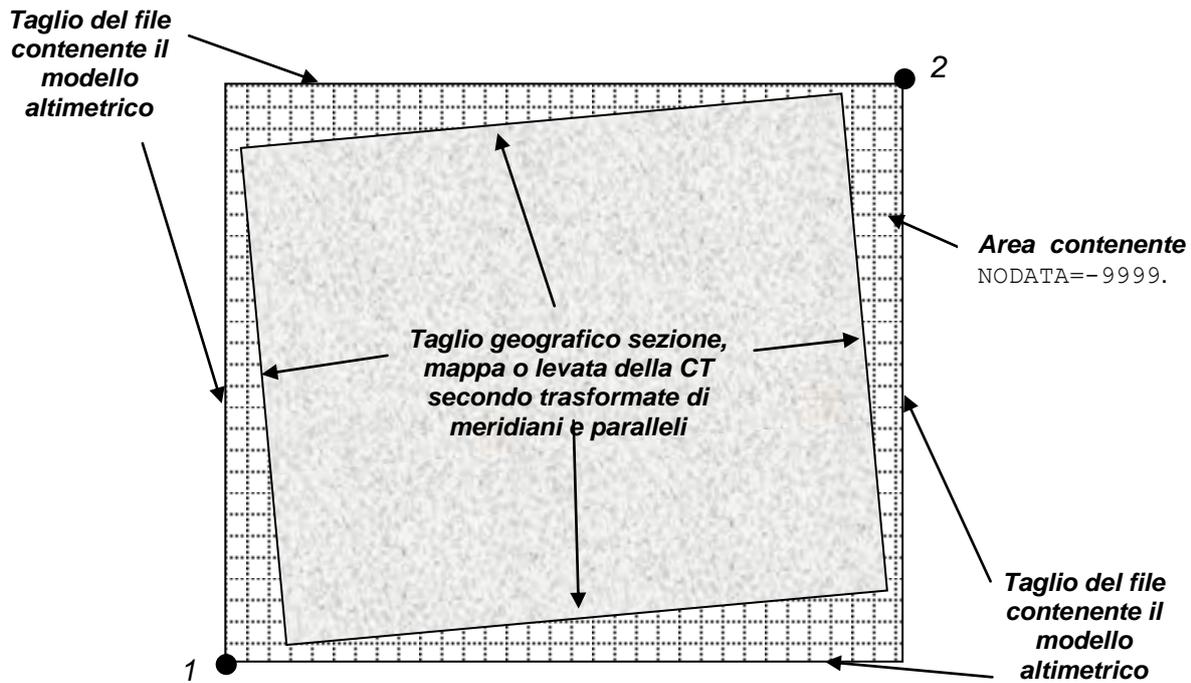


Figura 17 - Relazione tra taglio dei modelli altimetrici e taglio della CT

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:

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

Allo scopo di evitare sovrapposizioni con i modelli altimetrici adiacenti, i punti del grigliato esterni all'area del foglio di mappa vengono "azzerati" (NODATA = -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 6. In questo caso, le problematiche descritte in precedenza non hanno più ragione di esistere.

III.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 o .SHP. 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.

III.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.

III.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 utilizzate per classificare i modelli altimetrici in livelli di accuratezza, al fine di giungere ad una semplice schematizzazione riassuntiva.

In Tabella 16, sono riassunti i parametri principali delle specifiche tecniche relative ai vari livelli. Questa tabella è estratta dalle "Linee guida: ortoimmagini 10k e modelli altimetrici" con l'aggiunta del livello 9 utile per la scala 1:500.

Nei paragrafi seguenti, queste informazioni sono analizzate nel dettaglio solamente per le grandi e grandissime scale ovvero per i livelli 4 e superiori.

Livello	Tipo	Passo (m)	$T_{H(a)}$ (m)	$T_{H(b)}$ (DEM) (m)	$T_{H(c)}$ (DSM) (m)	T_{EN} (m)
0	DEM, DSM	40-100	30	30	30	20
1	DEM, DSM	20	10	20	10	10
2	DEM, DSM	20	4	½ al.m.al.	5	4
3	DEM, DSM	10	2	½ al.m.al.	3	2

4	DEM, DSM	5	0.60	1.20	0.80	0.60
5	DEM, DSM	2	0.40	0.80	0.54	0.40
6	DDEM, DDSM	1	0.60	1.20	0.80	0.60
7	DDEM, DDSM	0.50	0.30	0.60	0.40	0.30
8	DDEM, DDSM	0.10-0.20	0.20	0.30	0.26	0.20
9	DDEM, DDSM	0.05	0.15	0.30	0.20	0.10

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

Tabella 16 - Tabella riassuntiva delle caratteristiche dei vari livelli di modelli altimetrici

III.1.9.1 Specifiche per il livello 1

Tipologia DEM o DSM

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

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

Accuratezza 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 accuratezza sopra specificata.

Applicazioni principali: ortofoto alla scala 1:10.000 riprese con campo normale (angolo di apertura dell'ottica di circa 42 gon), ortofoto alla scala 1:10.000, ortofoto speditive in scala 1:5000 prodotte con immagini satellitari ad alta e altissima risoluzione

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

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.

III.1.9.2 Specifiche per il livello 2

Tipologia DEM o DSM

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

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

Accuratezza 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 4 m entro una maglia del grigliato.

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 accuratezza sopra specificata.

Delimitazione delle aree non rappresentabili ("zone morte"): specchi d'acqua, zone di minor accuratezza 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: ortofoto alla scala 1:10.000, ortofoto speditive in scala 1:5.000 se riprese in campo normale (angolo di apertura dell'ottica di circa 42 gon), ortofoto ordinarie in scala 1:5000 se derivate da immagini satellitari, studi ambientali, delimitazione dei bacini idrografici.

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

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

III.1.9.3 Specifiche per il livello 3

Tipologia DEM o DSM

Accuratezza in quota: in campo aperto $P_{H(a)}= 1\text{ m}$
 copert. arborea > 70% $P_{H(b)}= 1/4$ altezza media alberi (nel caso di DEM)
 edifici (nel caso di DSM) $P_{H(c)}=1.50\text{ m}$

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{H(a)}= 2\text{ m}$
 copert. arborea > 70% $T_{H(b)}=1/2$ altezza media alberi (nel caso di DEM)
 edifici (nel caso di DSM) $T_{H(c)}= 3\text{ m}$

Accuratezza 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 2 m 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 accuratezza sopra specificata.

Delimitazione delle aree non rappresentabili ("zone morte"): specchi d'acqua, zone di minor accuratezza 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: ortofoto ordinarie in scala 1:10.000, ortofoto ordinarie in scala 1:5000 solo se riprese in campo normale (angolo di apertura dell'ottica di circa 42 gon), ortofoto speditive in scala 1:5000 anche con ottica grandangolare (angolo di apertura dell'ottica di circa 75 gon), 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, LiDAR; opportuni nuovi rilievi fotogrammetrici se previste ortofoto a scala 1:5.000 o superiore.

III.1.9.4 Specifiche per il livello 4

Tipologia DEM o DSM

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

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

Accuratezza 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 accuratezza sopra specificata.

Delimitazione delle aree non rappresentabili ("zone morte"): edifici, specchi d'acqua, zone di minor accuratezza 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: ortofoto ordinaria alla scala 1:5000 anche con riprese con ottica grandangolare (angolo di apertura dell'ottica di circa 75 gon), ortofoto ordinaria alla scala 1:2000, ortofoto ordinaria alla scala 1:1000 solo con riprese in campo normale (angolo di apertura dell'ottica di circa 42 gon), 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: LiDAR con controllo fotogrammetrico, CT 1:1000, CT 1:2000.

III.1.9.5 Specifiche per il livello 5

Tipologia DEM o DSM

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

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{H(a)} = 0.40$ m

con copertura arborea > 70% $T_{H(b)}=0.80$ m (nel caso di DEM)
 edifici (nel caso di DSM) $T_{H(c)} = 0.54$ m

Accuratezza 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 accuratezza sopra specificata.

Delimitazione delle aree non rappresentabili ("zone morte"): edifici, specchi d'acqua, zone di minor accuratezza 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 1:1000.

Area di applicazione: Aree a rischio di inondazione aventi pendenza media inferiore a 1%; zone da rappresentarsi alla scala 1:1000.

Sorgente dei dati: LiDAR con controllo fotogrammetrico, CT 1:500, CT 1:1000.

III.1.9.6 Specifiche per il livello 6

Tipologia DDEM o DDSM

Accuratezza in quota: in campo aperto $P_{H(a)} = 0.30$ m
 copert. arborea >70%, arbusti >50 % (nel caso di DEM) $P_{H(b)} = 0.60$ m
 edifici (nel caso di DSM) $P_{H(c)} = 0.40$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{H(a)} = 0.60$ m
 Copert. arborea > 70% e arbusti >50 % (nel caso di DEM) $T_{H(b)} = 1.20$ m,
 edifici (nel caso di DSM) $T_{H(c)} = 0.80$ m

Accuratezza 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 accuratezza 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 (DDSM) fino alla scala 1:5000 (DDSM).

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

Sorgente dei dati: LiDAR eventualmente abbinato a un controllo fotogrammetrico, CT 1:2000, 1:1000, Mapping Mobile System.

III.1.9.7 Specifiche per il livello 7

Tipologia DDTM, DDEM o DDSM

Accuratezza in quota: in campo aperto $P_{H(a)} = 0.15$ m
copert. arborea >70%, arbusti >50 % (nel caso di DEM) $P_{H(b)} = 0.30$ m
edifici (nel caso di DSM) $P_{H(c)} = 0.20$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{H(a)} = 0.30$ m
copert. arborea > 70% e arbusti >50 % (nel caso di DEM) $T_{H(b)} = 0.60$ m,
edifici (nel caso di DSM) $T_{H(c)} = 0.40$ m

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

Tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 0.60$ 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 accuratezza 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 alla scala 1:500 solo se le riprese sono in campo normale (angolo di apertura dell'ottica di circa 42 gon), ortofoto di precisione (DDSM) fino alla scala 1:2000, ortofoto di precisione (DDSM) in scala 1:1000 solo se le riprese sono in campo normale (angolo di apertura dell'ottica di circa 42 gon).

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: LiDAR LiDAR eventualmente abbinato a un controllo fotogrammetrico, CT 1:1000, CT 1:500, Mapping Mobile System.

III.1.9.8 Specifiche per il livello 8

Tipologia DDEM o DDSM

Accuratezza in quota: in campo aperto $P_{H(a)} = 0.10$ m
copert. arborea >70%, arbusti >50 % (nel caso di DEM) $P_{H(b)} = 0.15$ m
edifici (nel caso di DSM) $P_{H(c)} = 0.13$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{H(a)} = 0.20$ m
Copert. arborea > 70% e arbusti >50 % (nel caso di DEM) $T_{H(b)} = 0.30$ m,
edifici (nel caso di DSM) $T_{H(c)} = 0.26$ m

Accuratezza 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 accuratezza 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 (DDSM) fino alla scala 1:2000 (passo 0.20 m), ortofoto di precisione (DDSM) fino alla scala 1:1000 (passo 0.10 m), ortofoto di precisione (DDSM) alla scala 1:500 se le riprese sono in campo normale (angolo di apertura dell'ottica di circa 42 gon).

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 LiDAR e fotogrammetria, CT 1:500 e/o carta delle coperture alla stessa scala, laser scanner terrestre, tecniche di rilievo dirette: livellazione geometrica, GNSS(*Global Navigation Satellite System*), tecniche topografiche moderne, Mapping Mobile System.

III.1.9.9 Specifiche per il livello 9

Tipologia DDEM o DDSM

Accuratezza in quota: in campo aperto $P_{H(a)} = 0.08$ m
 copert. arborea >70%, arbusti >50 % (nel caso di DEM) $P_{H(b)} = 0.15$ m
 edifici (nel caso di DSM) $P_{H(c)} = 0.10$ m

Tolleranza in quota: in campo aperto $T_{H(a)} = 0.15$ m
 Copert. arborea > 70% e arbusti >50 % (nel caso di DEM) $T_{H(b)} = 0.30$ m,
 edifici (nel caso di DSM) $T_{H(c)} = 0.20$ m

Accuratezza planimetrica: $P_{EN} = 0.05$ m (0.1 mm alla scala 1:500)

Tolleranza planimetrica: $T_{EN} = 0.10$ m

Passo di griglia: 0.05 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 accuratezza 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 (DDSM).

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 LiDAR e fotogrammetria, CT 1:500 e/o carta delle coperture alla stessa scala, laser scanner terrestre, tecniche di rilievo dirette: livellazione

geometrica, GNSS (*Global Navigation Satellite System*), le tecniche topografiche moderne, Mapping Mobile System.

III.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.

III.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.

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

III.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.

III.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 e 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 un'area edificata, la massima altezza dei viadotti, ecc.

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

III.1.10.2 Le verifiche di qualità sul prodotto finale

III.1.10.2.1 Valutazione dell'accuratezza tridimensionale

Differenza tra superfici con distanze euleriane 3D con stima di eventuali sistematismi

III.1.10.2.2 Procedure di riallineamento e eliminazione di errori sistematici

Stima di trasformazione tridimensionale per eliminare sistematismi

III.1.10.2.3 Verifica 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 accuratezza 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: $\sigma_{CP,H} < 1/10 * T_H$, $\sigma_{CP,EN} < 1/10 * T_{EN}$.

E' consentito l'utilizzo di vertici geodetici esistenti (IGM95 o capisaldi 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);
- $H_{CP,i}$ le quote dei punti di controllo;
- $\sigma_{CP,H}$ 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 $H_{MA,i}$ 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 $LE95_H$ che deve risultare minore della tolleranza in quota fissata T_H :

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

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 ($T_{H(a)}$, $T_{H(b)}$ e $T_{H(c)}$).

III.1.10.2.4 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 ($\sigma_{HR} \leq 1/5 \sigma_{MA}$) rispetto al modello altimetrico da verificare.

E' possibile procedere secondo due strategie, tra le quali è comunque sempre preferibile la seconda:

- 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 $T_{H(x)}$ come in III.1.10.2. L'unica differenza rispetto al punto III.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). E' possibile in questo modo mettere in evidenza gli eventuali sistematismi presenti e verificare che le distanze euclidee D siano minori delle tolleranze indicate in III.1.9 per il livello del modello altimetrico da verificare, come in III.1.10.2.

III.1.10.2.5 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 (CP);
- $E_{CP,i} N_{CP,i}$ 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 $CE_{95_{CP}}$:

$$CE_{95_{CP}} = 1.7308 \sqrt{\sigma_{CP,E}^2 + \sigma_{CP,N}^2} .$$

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} .

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

III.2 PRODUZIONE MEDIANTE TECNICHE LIDAR A GRANDE SCALA

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

III.2.1 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'aggettivo "*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 3D 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 e 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).

Inoltre la tecnologia LiDAR consente di ottenere direttamente anche il DSM per semplice interpolazione delle osservazioni, previa rimozione di eventuali errori grossolani.

III.2.2 CARATTERISTICHE GENERALI DELL'ACQUISIZIONE DATI

Un LiDAR o scanner laser costituisce un sistema integrato formato da un ricevitore GNSS, un distanziometro laser 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. E' 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 del segnale. 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.

III.2.2.1 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 (generalmente con frequenza di 1 Hz, possibilmente anche superiore, fino a 10 Hz) 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.

III.2.2.2 **Prodotti del rilevamento**

I prodotti ottenuti dal rilevamento LiDAR possono essere distinti in:

- ✓ dati grezzi, cioè la nuvola di punti acquisita, formata da più ritorni; la nuvola di punti, dopo la corretta georeferenziazione, contiene tutti gli attributi originariamente misurati. A corredo della nuvola di punti è necessario fornire metadati che ne descrivono le proprietà. La nuvola di punti è l'interfaccia tra l'acquisizione dei dati e interpretazione dei dati. Essa è la documentazione completa di ciò che è stato rilevato al momento del rilievo e va memorizzata. Infatti i modelli derivati dalla nuvola di punti dipendono dalla specifica applicazione per la quale vengono calcolati. Non c'è né un'unica definizione di modello digitale del terreno né di modello digitale di superficie. Memorizzando solo una versione interpretata di queste misure, cioè i modelli da essa derivati, si perde la possibilità di sfruttare tutte le caratteristiche del dato originale.
- ✓ 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 brusche variazioni altimetriche (variazione di quota superiore all'accuratezza nell'ambito di una cella della griglia), elencate nelle specifiche del livello considerato (III.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.

III.2.2.3 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 III.1.3 con precisione (σ) non inferiore a ± 5 cm, con frequenza di registrazione pari almeno a una misura al secondo (1 Hz). E' ammesso l'uso di Virtual RINEX generato da rete RTK in uno o più punti baricentrici rispetto alla zona del rilievo.

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.

III.2.2.4 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 5.

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 copertura 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 dell'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 aree di dimensioni pari o superiori a quelle previste per le celle della griglia del DSM e DEM prive di punti misurati.

Per la produzione di modelli altimetrici a grande e grandissima scala (livello 4 e superiori) ed in particolare nella produzione dei modelli densi (livello 6 e superiori), è necessario progettare il volo in modo efficace per minimizzare le zone d'ombra in aree urbane o in presenza di manufatti: se disponibili, si consiglia l'utilizzo di una cartografia sufficientemente aggiornata anche a media scala che contenga la descrizione volumetrica dell'edificato o di un DSM sufficientemente denso a media scala per analizzare correttamente gli oggetti rialzati rispetto al terreno.

In zone urbane, si può prevedere l'esecuzione di strisciate:

- con abbracciamenti ridotti al fine di limitare angoli di *off-nadir*;
- o con elevata sovrapposizione trasversale (40- 60 %).

La direzione delle strisciate e la loro posizione dovrà essere progettata anche in base alla rete viaria principale che definisce le direzioni prevalenti di strade/isolati/edifici caratterizzanti il tessuto urbano.

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 lungo la linea di volo tra i singoli punti rilevati.

I grafici dei progetti di volo dovranno essere realizzati su una cartografia a scala idonea (IGM 1:50000, 1:25000, ma anche la CTR scala 1:10000) secondo la dimensione della zona da riprendere in modo da garantire una corretta leggibilità. Gli elaborati dovranno essere forniti in forma digitale nel formato concordato con l'ente appaltante, potranno essere forniti in forma cartacea qualora richiesto dall'ente appaltantestesso 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 PDOP (sempre inferiori a 5) per il periodo previsto per il volo.

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

L'esecutore 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.

III.2.2.5 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,...) sia fabbricati grandi e regolari (ad esempio edifici industriali), che presentino particolari chiaramente individuabili in corrispondenza di variazioni brusche di pendenza (spigoli). 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 un'accuratezza 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.

III.2.2.6 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:

- ✓ L'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 (valori minimo, massimo, media, sqm) 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 dal ricevitore a bordo e la documentazione del processo di elaborazione;
- ✓ i file (in formato ascii) relativi alle misure IMU;
- ✓ 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 (anche nel caso di soluzione di rete)
 - 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;
- ✓ i dati acquisiti in formato LAS (LASer common data exchange format, vedi).

III.2.3 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.

A seguito di tali elaborazioni saranno consegnati:

- ✓ La 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.
- ✓ In alternativa alla carta delle differenze massime tra le quote dei punti relative a due strisciate, l'analisi della consistenza altimetrica tra strisciate contigue o perpendicolari sarà eseguita nel modo seguente. Dopo aver effettuato una selezione (da

concordare con la Commissione di Collaudo) di un numero significativo di zone di dimensione circa 100 m x 100 m nelle aree di sovrapposizione tra due strisciate, con un modello TIN si ricavano, a partire dai dati della prima strisciata, i valori di quota nei punti di osservazione della seconda strisciata (e viceversa). Si determinano quindi le differenze tra valori osservati e calcolati con il TIN. Devono essere consegnati: immagini georiferite delle zone relative alle differenze; file puntuali (pari al doppio delle zone, uno con le misure relative alla prima strisciata e uno con le misure relative alla seconda strisciata) con i punti di misura della strisciata (coordinate N,E,h) e la differenza di quota (calcolata a partire dal TIN) rispetto all'altra strisciata. Deve essere inoltre fornita una tabella (in formato di foglio elettronico) riassuntiva contenente per ogni zona media, mediana, deviazione standard delle differenze. Le zone devono essere corrispondenti a strisciate adiacenti e strisciate perpendicolari. Devono inoltre essere considerate zone omogeneamente distribuite su tutto il lotto e corrispondenti a diverse strisciate e (nel caso) diversi voli.

- ✓ la carta *raster* del numero di misure per ogni cella della griglia corrispondente al prodotto finale (le carte devono avere un taglio corrispondente al DTM/DSM 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 o in formato LAS; 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'esecutore 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.

III.2.3.1 Definizione delle quote ortometriche

La georeferenziazione dell'aeromobile e, conseguentemente, dei punti rilevati deve essere riferita al sistema di riferimento definito al punto III.1.3.

Inoltre, le quote ellissoidiche devono essere trasformate in quote ortometriche in base al modello di geoidi (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).

III.2.3.2 Filtraggio e classificazione

Tra i prodotti oggetto di consegna, l'esecutore 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 nell'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'esecutore del rilievo per verificare la bontà del risultato ottenuto;
- ✓ i file contenenti le coordinate planimetriche, le quote ortometriche, il valore dell'intensità e il codice di classificazione.

III.2.3.3 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).

III.2.4 IL CONTROLLO DI QUALITÀ'

In corso d'opera saranno eseguite visite presso i locali dell'esecutore 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 (III.2.2.6 e III.2.3.3) per la valutazione dell'adeguatezza rispetto alla qualità del risultato finale atteso.

III.2.4.1 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.

III.2.4.1.1 La verifica del volo

Al termine del volo LiDAR, i dati grezzi devono essere consegnati secondo le specifiche definite in . E' 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 PDOP 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 95%) e occorre confrontare le 3 traiettorie indipendentemente determinate con le 3 stazioni GNSS permanenti a terra e quella derivante dall'elaborazione congiunta GNSS-IMU. Le differenze tra queste 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 $(1.4142 * P_{H(a)})$, con $P_{H(a)}$ (III.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.

III.2.4.1.2 La verifica dell'elaborazione dei dati

In questa fase si devono eseguire i seguenti controlli:

- La correttezza dell'applicazione del più recente modello di geoidi 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 III.1.10.1.2.

III.2.4.2 Controllo finale

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

III.3 PRODUZIONE MEDIANTE TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE A GRANDE SCALA

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 III.1.9.

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

III.3.1 GENERALITÀ SULL'IMPIEGO DELLA FOTOGRAMMETRIA

I metodi fotogrammetrici offrono una grande varietà di opzioni per la derivazione di 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, l'accuratezza nella determinazione fotogrammetrica del DEM in terreno aperto è pari a circa 0.06-0.1 ‰ della quota relativa di volo nel caso di utilizzo di camera analogica.

La fotogrammetria è comunque alquanto condizionata dalla copertura vegetale: nelle aree boschive l'accuratezza è notevolmente inferiore.

Un ulteriore incremento nell'automazione del processo è dato dalla recente tecnica della georeferenziazione diretta che semplifica le operazioni di appoggio a terra e dall'introduzione sul mercato di camere digitali a grande formato per piattaforma aerea.

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

La fotogrammetria offre una vasta gamma di prodotti e metodi di lavoro. E' una procedura standard per la produzione di carte numeriche, l'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 aerofotogrammetriche sono usate principalmente per i Livelli 0÷3 del DEM, 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.

III.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, situazione ormai pressoché generale)
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, situazione ormai pressoché generale);
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.

III.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 un'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 l'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 determinazione 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 un'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.

III.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.

III.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.

III.3.2.3.2 Caratteristiche delle camere da presa

È ammesso l'utilizzo di camere metriche fotografiche o digitali. La tecnologia moderna è indirizzata all'utilizzo esclusivo delle camere digitali, tuttavia è ammesso l'utilizzo di camere fotogrammetriche tradizionali. 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*) o TDI (*Time Delay and Integration*) per l'eliminazione del trascinamento (in particolare alle quote relative di volo più basse) ed è prescritto l'uso di dispositivi per la correzione della deriva durante il volo.

III.3.2.3.3 Caratteristiche dei voli

Nel caso di utilizzo di camere metriche fotografiche si dovranno rispettare i parametri indicati in *Tabella 17* indicati in funzione del livello di modello altimetrico da produrre (vedi III.1). Sono stati omessi i livelli 0-2 in quanto relativi alle scale piccole e medie non analizzate in questo documento.

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

Livello	Prec. Quota (m)	Scala di rif. 1:	Fatt. molt	Scala Media	Variatz 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)
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 17 - Parametri di volo in funzione del livello di modello altimetrico

Livello	Prec. in quota (m)	GSD max (m)	GSD Med (m)	GSD min (m)
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 18 - 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 17* può essere espressa in termini di GSD nella *Tabella 18*, 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%.

Per la produzione di modelli altimetrici in ambito urbano, al fine di limitare le zone nascoste per motivi prospettici, è consigliabile utilizzare un volo fotogrammetrico a stereoscopia multipla:

- in centri storici o territori fortemente urbanizzati in cui generalmente la larghezza della sede stradale è minore dell'altezza degli edifici adiacenti, è consigliabile ricorrere ad una copertura stereoscopica quadrupla ovvero con almeno 4 modelli stereoscopici possibili per ogni porzione del territorio considerato. In questo caso è necessario ricorrere a un ricoprimento longitudinale compreso fra il 75% e il 90% e un ricoprimento trasversale di norma pari al 60 % e in nessun caso inferiore al 50 %;
- in territori con media densità abitativa caratterizzata da edifici di limitata altezza e larghezza della sede stradale sempre maggiore dell'altezza degli edifici, è possibile ricorrere ad una stereoscopia doppia. In questo caso il ricoprimento longitudinale deve sempre essere compreso fra il 75% e il 90%, ma si può ridurre il ricoprimento trasversale di norma pari al 40 % e in nessun caso inferiore al 35 %.

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%.

Per la produzione di modelli altimetrici in ambito urbano con camere *push-broom*, al fine di limitare le zone nascoste per motivi prospettici, è consigliabile utilizzare un volo fotogrammetrico a stereoscopia multipla in cui il ricoprimento trasversale sia di norma pari al 60 % e comunque sempre maggiore del 50 %.

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;
- le immagini devono avere caratteristiche radiometriche sostanzialmente omogenee, siano prive di hotspot e/o di fenomeni di viraggio cromatico significativi e soddisfino i requisiti radiometrici contenuti in II.1.5.

III.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 30°.

Nelle giornate caratterizzate da soleggiamento molto intenso, è necessario prestare molta attenzione ai fenomeni di *hot-spot* (II.2.1.5).

E' necessario porre particolare attenzione nella scelta del periodo e dell'ora di volo, anche in funzione della tipologia di vegetazione prevalente.

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 un periodo dell'anno in cui le latifoglie sono spoglie. Qualora il volo si utilizzi anche per la produzione dell'ortofoto, è necessario arrivare ad un compromesso tra l'assenza di fogliame necessaria per avere un modello altimetrico corretto e completo e la presenza del fogliame per una buona resa cromatica dell'ortofoto.

III.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 adeguata (1:10000-1:50000) 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 anche 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.3.2.3.6 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;
- "il 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 (in scala adeguata, per es. 1:25.000), in forma digitale con formato da concordare con la Direzione dei Lavori, sentito il Collaudatore, ed eventualmente in forma cartacea a richiesta della Direzione dei Lavori (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) secondo le specifiche "Intesa GIS, National Core" 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, ...) contenenti le immagini digitali originali in formato TIFF/LZW.

III.3.2.4 Orientamento delle immagini

Ogni immagine prodotta dovrà essere opportunamente orientata nel sistema di riferimento specificato negli standard di riferimento III.1.3 secondo il procedimento proposto dalla Ditta.

Sono ammesse tutte le tecniche di orientamento, purché ampiamente sperimentate e opportunamente documentate: fotogrammetria diretta con triangolazione fotogrammetrica di affinamento e alcuni punti di appoggio, 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.

III.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.

III.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. In particolare si consiglia di utilizzare le tecniche di *matching* di ultima generazione tra cui le procedure multi-immagine.

É tuttavia necessario:

- 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 l'ampiezza 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.

III.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, dalla tipologia di modello altimetrico da generare (DEM o DSM) e dalle caratteristiche del territorio (aperta campagna, montagna, media urbanizzazione, urbanizzazione densa ecc.). 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, analogamente al caso precedente, il risultato finale deve essere un reticolo a punti regolari con l'ampiezza 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.

III.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 (III.1.5.3 e III.1.9).

Tali elementi geometrici devono essere tracciati mediante restituzione fotogrammetrica manuale.

III.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, Hard Disk esterni, ...) con l'indicazione della eventuale struttura in cartelle utilizzata;
 - su adeguati supporti (DVD, CD, Hard Disk esterni, ...), 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,...);
 - 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: *headx...x.ext*, dove *x...x* è il nome della mappa descritta secondo il taglio cartografico standardizzato, *ext* è l'estensione che caratterizza il *file* e *head* è una radice dipendente dal tipo di *file* secondo quanto specificato in Tabella 19.

Tipo del file	Head
<i>metadati</i>	MTD_DEM
<i>TIN</i>	TIN
<i>DEM generato</i>	DEM
<i>breakline, ...</i>	BRK

Tabella 19 - Specificazione del prefisso del nome del file

III.3.3 IL CONTROLLO DI QUALITÀ

Come descritto in III.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.

III.3.3.1 Controllo di qualità del volo stereoscopico

III.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;

- 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.

Nel caso di immagini digitali è necessario sottoporre un campione di immagini, pari al 5 %, a un controllo di qualità sul rumore e sulla effettiva risoluzione geometrica (*full width half maximum* e *modulation transfer function*).

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

III.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.

III.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.

III.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 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 metodologie di verifica definite in modo specifico.

III.3.3.3 Collaudo finale del modello altimetrico

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

III.4 PRODUZIONE MEDIANTE CARTOGRAFIA NUMERICA ESISTENTE A GRANDE SCALA

III.4.1 INTRODUZIONE

La produzione di modelli altimetrici può anche avvenire senza l'ausilio di costose e sofisticate strumentazioni necessarie 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 e offre il vantaggio di essere utilizzabile con strumentazioni sostanzialmente semplici (PC standard), purché dotati comunque di strumenti *software* che applichino tecniche di interpolazione raffinate.

Inoltre, l'uso di cartografia numerica 3D e della carta delle coperture anche semplificate rende possibile la produzione di modelli altimetrici a grandissima scala (livello 9) altrimenti generabili solamente con tecniche di rilievo diretto a terra o LiDAR terrestre.

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.

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. E' inoltre ovvio che una carta obsoleta non merita lo sforzo della sua digitalizzazione perché il prodotto ottenuto avrà un grado di aggiornamento insufficiente (può tuttavia aver valore se lo scopo è la valutazione delle variazioni morfologiche mediante confronto di modelli digitali del terreno riferiti a epoche diverse).

Si consiglia in generale 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 delle coperture.

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. Per quanto riguarda la definizione dei termini utilizzati si rimanda al capitolo V.

III.4.2 CARATTERISTICHE DELLA CARTA NUMERICA UTILIZZATA

III.4.2.1 Il sistema di riferimento

Il sistema di riferimento della cartografia numerica disponibile talvolta non corrisponde a quello stabilito in III.1.3. Occorre pertanto trasformare la cartografia disponibile nel sistema di riferimento cartografico più attuale in modo da renderlo coerente con le specifiche III.1.3.

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.

III.4.2.2 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 una definizione dettagliata del modello altimetrico;
- deve essere presente la gran parte delle *breakline* necessarie per il livello di modello altimetrico da generare: 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 (DSM sia ordinario sia denso) devono essere presenti informazioni dettagliate circa la descrizione volumetrica degli edifici o eventualmente una carta delle coperture.

III.4.2.3 La precisione richiesta

La scala nominale della cartografia deve garantire le tolleranze richieste per il livello previsto in III.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 20 che indica la scala nominale della cartografia numerica disponibile, necessaria per la produzione dei vari livelli di modello altimetrico.

III.4.3 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.

E' 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
1	1:25000
2	1:10000
3	1:5000
4	1:2000
5	1:1000
6	1:2000
7	1:1000
8	1:500
9	1:500

Tabella 20 - Relazione tra scala della cartografia e i livelli di modello altimetrico

III.4.4 L'ACQUISIZIONE DATI PER I MODELLI ALTIMETRICI DA CARTOGRAFIA NUMERICA ESISTENTE

III.4.4.1 Generazione di un DEM

La procedura di generazione di modelli altimetrici del terreno prevede la creazione di un seminato di punti (A) 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,...);
- 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 (III.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 (V.2.2).

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

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

III.4.4.2 Generazione di un 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 C.

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 delle coperture. In questo caso il DSM può essere prodotto secondo le specifiche descritte nel punto successivo.

III.4.4.3 DDSM derivato dalla carta delle coperture

Si utilizza la rappresentazione dei tetti degli edifici (vedi carta delle coperture in V.2.6) 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 delle coperture, 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.

III.4.5 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 III.1.9.

IV SOVRAPPOSIZIONE CON CARTOGRAFIA CATASTALE

IV.1 LA CARTOGRAFIA CATASTALE

La cartografia Catastale è estesa a tutto il territorio nazionale e realizzata per circa l'80% alla scala 1:2.000. Essa rappresenta il tematismo della proprietà ed è dunque uno strumento imprescindibile per la gestione del territorio, specie se integrata con altri DB topografici e ortofoto. L'Agenzia del Territorio dispone ormai delle mappe in formato vettoriale, nel sistema nativo Cassini Soldner, praticamente su tutto il territorio nazionale e sono in corso le operazioni per l'acquisizione delle mappe originali d'impianto in formato raster. Esse, sebbene non aggiornate, rappresentano la base metrica "più precisa" a disposizione.

Per facilitare l'integrazione del DB catastale con altri DB topografici e ortofoto a grande scala, diventa indispensabile la condivisione dello stesso sistema di riferimento e dunque diviene di rilevante importanza la trasformazione di mappe catastali verso il nuovo sistema cartografico UTM WGS84, nella realizzazione ETRF2000 (nel seguito UTM-WGS84), definita dalla Rete Dinamica Nazionale (RDN).

La tipologia dei sistemi di riferimento e del materiale geodetico che il Catasto ha utilizzato in Italia è varia. Nel seguito alcune generalità sulla genesi dei sistemi di riferimento catastali e sugli approcci di trasformazione. Gli approcci analitici e metodologici sono già descritti in Barbarella, Radicioni e Sansò (2009) "lo sviluppo tecnologico delle reti geodetiche" al capitolo 2 (Applicazioni catastali delle reti geodetiche GNSS) [16]. A tale documento si fa esplicito riferimento per tutti i dettagli che verranno richiamati.

IV.1.1 ALCUNE GENERALITÀ SUI SISTEMI DI RIFERIMENTO CATASTALI

La carta catastale Italiana si basa su sistemi di riferimento locali e prevalentemente sul sistema di proiezione cartografica Cassini Soldner che appartiene alla categoria delle rappresentazioni "afilattiche" (da *a* privata e *flactus* che conserva) che non conservano né angoli né aree.

Nata in seguito all'emanazione della prima legge costitutiva del Catasto italiano (legge *Messedaglia* n°3682, del 1 marzo 1886), in alcune province furono utilizzate le cartografie dei catasti pre-unitari ritenute ancora valide, anche se, in molti casi, non collegate a vertici trigonometrici e quindi non inquadrare in alcun riferimento geodetico. Per la nuova formazione il Catasto utilizzò la rete di inquadramento geodetica fondamentale in alcune zone non ancora completamente realizzata dall'Istituto Geografico Militare, senza attendere la pubblicazione dei dati compensati finali di quest'ultima ma usando, man mano che erano resi disponibili dall'IGM, i dati provvisori o, addirittura, non compensati.

Nella fase iniziale, la non conoscenza dei dati definitivi della rete di inquadramento IGM, non permise di realizzare reti di raffittimento di grande estensione. Ciò fu la causa della realizzazione di numerosi sistemi di riferimento delle reti di inquadramento cartografico di dimensioni ridotte, detti "piccole origini", che si concentrano in 19 province italiane. Essi risultano in numero di 818, ma ad essi vanno sommati ulteriori sistemi d'assi, come ad esempio quelli legati alla mappa Rabbini, che in Piemonte sono più di 400. Dal 1910 circa, fu possibile procedere alla realizzazione di 31 sistemi di riferimento di grande estensione, detti "grandi origini", per l'inquadramento della cartografia delle restanti province. Nei decenni di formazione del Catasto furono adottati diversi tipi di proiezioni cartografiche che, in ordine cronologico, sono: *Sanson-Flamsteed*, *Cassini-Soldner*, *Gauss-Boaga*.

È importante notare che il passaggio da coordinate Cassini-Soldner a quelle di Gauss non è una semplice trasformazione, ma comprende in sé ben altri problemi, come quello originato dalla determinazione delle coordinate dei vertici di raffittimento antecedentemente all'unificazione delle reti nazionali. In pratica tra le reti topografiche alle quali sono appoggiati i lavori catastali e quella da cui dipendono le coordinate UTM-WGS84, non esiste una relazione semplice e il problema è complicato oltre che dalla diversità degli ellissoidi anche dalla non uniformità degli orientamenti adottati per l'ellissoide di Bessel. La trasformazione fra sistemi di riferimento, catastale e nazionale, deve dunque tenere conto della loro storia per poterne comprendere gli effetti, la precisione e la validità.

È naturalmente implicito che ogni errore insito nel sistema di riferimento d'impianto o nella realizzazione della mappa risulterà di tale entità anche a valle della più rigorosa procedura di trasformazione verso il nuovo WGS84. L'inserimento della cartografia catastale nel nuovo DATUM ha dunque valenza cartografica e non topografica per quanto riguarda la precisione. Ancora, se la mappa d'impianto rappresenta la base metrica più precisa, analoga precisione potrebbe non essere riscontrabile nei successivi rilievi di aggiornamento o nel loro inquadramento. Il buon esito della "sovrapposibilità" della cartografia catastale su una moderna ortofoto non può prescindere dunque da queste considerazioni legate alla storia dei rilievi e dei successivi aggiornamenti. E neppure possono essere riscontrate deformazioni rilevanti del territorio avvenute nel corso di più di un secolo. (ovvio).

Infine, essendo l'unità di riferimento "la mappa" ed essendo quasi tutte costruite "a perimetro chiuso", dal punto di vista cartografico possono esservi delle incongruenze metriche e topologiche sui bordi che non sono sanabili.

Da un punto di vista cartografico, ricordiamo che la proiezione di Gauss a partire dalla quale è espresso il sistema UTM-WGS84 è di tipo conforme con deformazioni lineari, areali e superficiali diverse da quella di Cassini Soldner, afillattica. Ne consegue che una stessa figura viene deformata diversamente nel passaggio dall'ellissoide ai due piani di rappresentazione. L'effetto, volutamente evidenziato per motivi di visualizzazione, è quello ritrovabile in Figura 18.

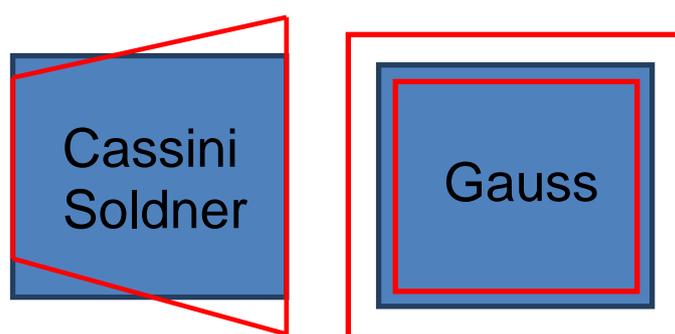


Figura 18–Deformazioni nelle carte di Gauss e Cassini Soldner nel passaggio da superficie di riferimento (blu) a piano cartografico (rosso)

Per questo motivo gli approcci di trasformazione non possono prescindere da procedimenti geodetici e cartografici che tengano in conto la natura delle equazioni delle rappresentazioni cartografiche, specie se eseguiti su vaste estensioni di territorio.

IV.2 PROCEDURE PER IL RECUPERO RIGOROSO DELLA CARTOGRAFIA CATASTALE

Le procedure rigorose di trasformazione da DATUM Catastale a WGS84 (nella sua accezione più moderna, vedi II.1.1) possono essere distinte in diversi processi:

- 1) **Trasformazioni “globali”** per portare il DB catastale dal sistema originario in coordinate Cassini Soldner a UTM-WGS84, avvalendosi di procedure geodetiche e cartografiche basate sull'impiego dei centri d'emanazione o di punti di doppie coordinate.
- 2) **Trasformazioni “locali”** per rendere coerenti le geometrie catastali con altri DB assunti come riferimento dal punto di vista geometrico. Con queste trasformazioni si vogliono assorbire deformazioni locali che possono essersi sia prodotte nella fase di impianto (errato calcolo di punti d'appoggio ai quali si riferisce il rilievo di dettaglio della mappa), sia degni della precisione metrica che possono essersi generati nel corso del processo produttivo di vettorializzazione delle mappe cartacee.
- 3) **Trasformazioni “puntuali”**, finalizzate a georeferenziare correttamente geometrie (edifici o altro) che risultano collocati sulla mappa in maniera imprecisa o errata, incoerenti con particolari adiacenti e con errori che non possono essere attribuiti a distorsioni locali. Esse devono essere trattati singolarmente

Questi passi devono essere eseguiti in sequenza: la trasformazione globale può evidenziare, a seguito di una sovrapposizione ad un DB o ortofoto di precisione adeguata, deformazioni locali. Le deformazioni puntuali non devono inficiare la stima della trasformazione di tipo locale, e sono da risolvere caso per caso. Le trasformazioni puntuali devono dunque essere risolte solo dopo le trasformazioni locali e applicate sulle geometrie catastali che continuano a presentare scarti elevati rispetto al DB topografico di riferimento.

Verrà trattato il solo problema delle trasformazioni globali, rimandando le altre ai casi citati in bibliografia, non affrontando in questa sede il problema del miglioramento della precisione della mappa catastale e delle sue geometrie ma solo la sua trasformazione nel sistema di riferimento WGS84 per una ottimale sovrapposizione all'ortofoto a grande scala.

IV.2.1 TRASFORMAZIONI “GLOBALI” DA SISTEMI CATASTALI A WGS84

Riguardo alle trasformazioni globali, possiamo individuare per lo meno i due approcci che seguono.

IV.2.1.1 Trasformazioni “globali” per punti di doppie coordinate

La metodologia, partendo dalle informazioni disponibili presso l'Agenzia del Territorio (in particolare le mappe di impianto, alle quali si ritiene necessario riferirsi per l'individuazione dei “punti doppi”), consente la stima delle trasformazioni “globali” idonee a georeferenziare il DB catastale nel sistema cartografico UTM-WGS84 (nella sua accezione più moderna, vedi II.1.1).

In generale si ipotizza la coerenza dei fogli di mappa d'impianto nell'ambito della medesima origine, cosicché la ricerca dei punti doppi può essere effettuata per origine e non per foglio di mappa.

Se da un lato sono consolidati gli algoritmi di trasformazione tra i diversi sistemi cartografici catastali ed il sistema UTM-WGS84 (Di Filippo, 2003; Di Filippo, 2004), dall'altro la loro applicazione richiede la disponibilità di "punti doppi", ovvero punti di coordinate note nel generico sistema cartografico catastale e nel sistema UTM-WGS84.

La determinazione delle coordinate dei "punti doppi" si articola essenzialmente in tre fasi:

- scelta dei punti, che necessariamente deve essere eseguita sulle mappe di impianto, in quanto costituiscono la base cartografica catastale più precisa e, soprattutto, intrinsecamente coerente (non deformata) dal punto di vista geodetico-cartografico;
- rilievo delle coordinate cartografiche catastali dei punti prescelti;
- rilievo delle loro posizioni sul territorio con sensori GNSS e stima delle loro coordinate cartografiche UTM-WGS84.

E' proprio in quest'ultima fase che la disponibilità dei servizi di posizionamento di una rete di stazioni permanenti GNSS può essere conveniente per velocizzare le operazioni di misura. Si sottolinea che la scelta dei punti è probabilmente l'operazione più delicata, in quanto deve essere eseguita garantendo una sufficiente affidabilità della successiva trasformazione (sono necessari almeno 2 punti ma per una valida stima minimi quadrati ne occorrono di più) e, nel contempo, individuando punti che siano ancora effettivamente presenti e rilevabili sul territorio, operazione non sempre semplice – soprattutto nelle zone che hanno subito notevoli trasformazioni urbanistiche – se si considera che le mappe di impianto possono risalire anche a diverse decine di anni fa.

IV.2.1.2 Trasformazioni "globali" per origini dei sistemi d'asse

La metodologia si basa su considerazioni geodetiche e cartografiche che mostrano come sia possibile riproiettare i punti dal sistema cartografico catastale al sistema UTM-WGS84 passando tramite le superficie dei due ellipsoidi corrispondenti purché sia nota l'origine del sistema catastale nel sistema UTM-WGS84. Se l'origine non è nota può essere ricavata a partire dalle sue coordinate approssimate mediante una procedura iterativa rapidamente convergente; tali coordinate approssimate, a loro volta, possono essere ricavate dalle coordinate di almeno due punti doppi. Conseguentemente, anche in questo caso, la disponibilità dei servizi di posizionamento di una rete di stazioni permanenti GNSS può essere conveniente per velocizzare le operazioni, nel caso in cui non si disponesse di monografie di punti di doppie coordinate nel materiale d'archivio ritrovabile presso gli uffici provinciali dell'Agenzia del Territorio.

I due metodi ("punti doppi e coordinate" e per "origini") non vanno intesi come antitetici ma rappresentano due approcci allo stesso problema e possono utilmente integrarsi aumentandone le potenzialità e diminuendo le criticità di ognuno.

Ad esempio, disporre di punti di doppie coordinate permette di rideterminare l'origine del sistema catastale che li ha generati, stimandone le coordinate nel sistema d'arrivo, con la relativa matrice di covarianza. Ciò consente una stima della precisione e affidabilità dell'origine o una validazione del dato eventualmente presente in monografia. Il metodo si può adattare quindi alla determinazione di origini delle quali si sia persa la provenienza o la documentazione, oppure ancora nel caso dell'origine catastale posta su un "punto ideale", ovvero senza una sua pratica materializzazione.

D'altro canto, il metodo "per trasformazioni di origini", quando queste siano state verificate come affidabili, può portare a generare analiticamente i punti di doppie coordinate nella densità voluta e per ogni origine catastale, per l'applicazione del metodo basato sui punti doppi. Ciò permette di prescindere, per lo meno in linea teorica, dalla loro conoscenza o dal loro rilievo sul terreno con tutti i problemi legati al riconoscimento di particolari da rilevare che si siano mantenuti inalterati dall'impianto ad oggi.

In entrambi i casi è di grande importanza la conoscenza o la ricostruzione degli elementi geodetici che caratterizzano il sistema di riferimento, ovvero la conoscenza delle reti a cui sono stati appoggiati i rilievi catastali.

IV.2.2 REPERIMENTO DEI PUNTI DI DOPPIE COORDINATE

Intendiamo con punti di doppie coordinate (nel seguito anche "punti doppi"), vertici di cui sia nota la monografia con le coordinate note sia nel sistema Bessel - Cassini Soldner che nel sistema Roma40 - Gauss-Boaga. Di detto materiale va verificata la disponibilità e lo stato di conservazione negli archivi dei vari uffici provinciali dell'Agenzia del Territorio.

Va subito detto che l'approccio di trasformazione tra il sistema Gauss Boaga e UTM-WGS84, andrà affrontato col metodo di trasformazione continua stabilito dall'IGM (approccio VERTO), basato sui grigliati di isovariazione delle coordinate tra i due sistemi: di tale trasformazione, sperimentata e consolidata, non si parlerà in questa sede.

Disporre di vertici di doppie coordinate risulta particolarmente importante in quanto permette la "ricostruzione" dei sistemi di riferimento da cui sono state generate le poligonali per appoggiare il rilievo di dettaglio della mappa.

I punti doppi possono essere relativi a:

- 1) vertici di rete catastale che costituisce la "materializzazione pratica" del sistema d'asse catastale;
- 2) punti d'emanazione dei sistemi d'asse.

Nota l'origine catastale è possibile generare punti di doppie coordinate (Figura 19) nella densità voluta oppure, noti punti doppi di doppie coordinate (Figura 20), è possibile rideterminare l'origine catastale con la stima della sua precisione e affidabilità, con metodo geodetico rigoroso: questo metodo dell' "origine fittizia" è spiegato in [31].

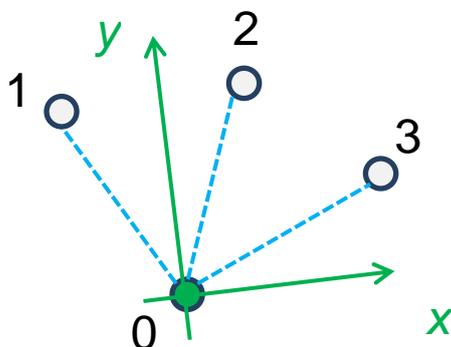


Figura 19 – origine catastale (0) e vertici catastali

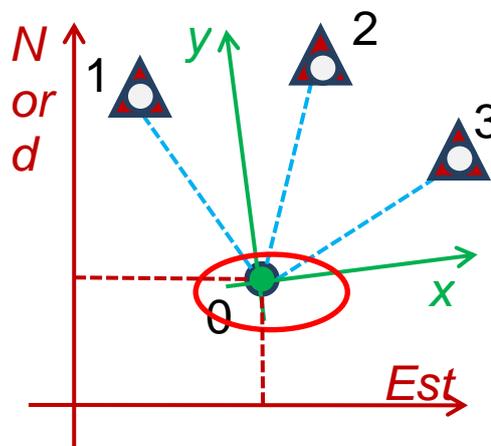


Figura 20 – punti doppi (1, 2, 3) e stima della

(1, 2, 3)

posizione dell'origine nel sistema di Gauss

In mancanza di punti di doppie coordinate documentati con monografie, o di informazioni sull'origine catastale, la loro determinazione può essere effettuata con rilievo diretto sul terreno delle coordinate di particolari ritrovabili con sicurezza sulla mappa originale d'impianto.

Detta operazione presenta maggiori incertezze in quanto la precisione delle coordinate catastali deducibili dalla mappa d'impianto è di tipo cartografico. La precisione delle misure topografiche per determinare le coordinate nel nuovo sistema di riferimento può essere di tipo centimetrico, se effettuata con operazioni topografiche.

La maggior produttività si ottiene con misure RTK da rete di stazioni permanenti GNSS che consentono di raggiungere la precisione centimetrica con la soluzione ad ambiguità fissata. Per la determinazione di queste coordinate è bene utilizzare una doppia misura RTK, forzando una "nuova inizializzazione" per poter verificare l'affidabilità delle coordinate o la presenza di "falsi fissaggi" dell'ambiguità di fase. Questa operazione non comporta sostanziali appesantimenti delle operazioni di misura a fronte di una importante verifica della misura RTK per sua natura poco "poco ridondante".

Ulteriore verifica o miglioramento della posizione può essere fatta con acquisizione statica anche per pochi minuti con ricevitori geodetici GNSS doppia frequenza e successiva post elaborazione alle doppie differenza di fase. Questa operazione può richiedere anche solo brevi acquisizioni (5 minuti) se si utilizza un nuovo prodotto da rete RTK detto Virtual RINEX, creato dal centro di controllo della rete GNSS su richiesta dell'utente, nella posizione prossima al ricevitore rover.

In mancanza della stazionabilità del punto prescelto, è possibile la determinazione delle sue coordinate con operazioni topografiche "fuori centro" da una baseline GPS e da punti RTK, con misura di angoli e distanze e schemi che comportino un trascurabile degrado di precisione.

In ultima analisi, la determinazione dei punti doppi può essere fatta con rilievo delle coordinate UTM-WGS84 da una cartografia di adeguata precisione, intendendo con ciò una cartografia con denominatore di scala non superiore a quello della mappa catastale in oggetto. Su di queste vengono riconosciuti particolari presenti sia sulla mappa d'impianto che sulla carta tecnica e rilevate le coordinate cartograficamente. L'operazione presenta una precisione ancora inferiore a quella degli altri due metodi in quanto si deve considerare il degrado che la determinazione cartografica delle coordinate UTM WGS84 comporta rispetto alle operazioni topografiche di rilievo sul terreno. Occorre considerare infine che la singola entità riconoscibile nelle due cartografie, è stata rilevata con criteri diversi: non sempre la muratura dell'edificio misurata "all'altezza del petto di un uomo" corrisponde a ciò che si rileva anche fotogrammetricamente.

IV.2.3 VERIFICHE DI QUALITÀ

Occorre innanzi tutto chiarire cosa si intenda per "verifiche di qualità", quando si parla di sovrapposizione di mappe catastali ad ortofoto: generalmente questo concetto è legato al rispetto di tolleranze metriche da cui dipende l'accettazione del lavoro cartografico.

Considerazioni diverse devono invece essere fatte quando si cerchi la "miglior sovrapposibilità" della mappa catastale, rilevata e restituita più di un secolo fa, con i moderni

DB topografici. Oggetto di questo paragrafo è la definizione di procedure per la miglior “trasformazione globale” a WGS84, consci del fatto che errori “storici” nel rilievo d’impianto o nei più moderni rilievi di aggiornamento, verranno riportati in egual entità nel nuovo sistema di riferimento.

Una trasformazione globale e la sovrapposizione ad una carta tecnica o ortofoto, potrà mettere in evidenza ciò che nella mappa catastale si discosta in maniera eccessiva dalla carta di riferimento. Ciò non deve necessariamente comportare un rifiuto della procedura di trasformazione, se essa è eseguita rigorosamente e con parametri la cui accettabilità avviene con criteri statistici, o del risultato stesso della trasformazione, bensì la consapevolezza della possibile presenza di deformazioni di tipo locale o puntuale nella mappa catastale, da individuare e correggere con metodologie non oggetto di questa trattazione, da parte dall’Agenzia del Territorio.

IV.2.3.1 Le verifiche di qualità interna

Le verifiche di qualità interna presuppongono un procedimento geodetico rigoroso basato sull’impiego dei punti di doppie coordinate o sui centri d’emanazione. Entrambi gli approcci si basano sulla stima minimi quadrati di parametri di rototraslazione e scala o sulla determinazione dell’origine da cui generare la trasformazione a WGS84 a partire da punti di doppie coordinate di cui al paragrafo Reperimento dei punti di doppie coordinate IV.2.2.

La determinazione di tali parametri va fatta con un numero di punti doppi “ridondante”. Vista la possibilità di errori di trascrizione delle coordinate da monografia a file o di errori storici nelle monografie stesse, spesso la stima minimi quadrati può essere fortemente deviata senza che l’osservazione dei residui, o dei residui normalizzati, possa permettere in prima battuta un efficiente *data-snooping* per la ricerca degli errori. In questo caso è consigliabile l’utilizzo di stime di tipo “robusto”, capaci di fornire una stima della soluzione corretta, anche in presenza di numerosi errori grossolani. Detti metodi possono essere basati su algoritmi tipo LMS (*Least Median Square*) e vanno applicati per eliminare gli errori prima dell’applicazione del calcolo minimi quadrati.

A valle della stima minimi quadrati andrà ancora valutata l’idoneità dei punti doppi ad essere usati nella trasformazione. In particolare si valuteranno gli scarti sulle equazioni di rototraslazione per i punti doppi, il loro scarto e il residuo normalizzato.

Gli scarti dovranno risultare minori di una tolleranza T cautelativamente pari a $T=1m$, al solo fine dell’eliminazione di valori anomali.

La semplice osservazione degli scarti può non essere sufficiente per l’individuazione di un errore grossolano. Questo in quanto gli scarti appartengono a popolazioni a media nulla e varianza σ_v^2 . Il metodo più rigoroso consiste nel sottoporre a test il “residuo normalizzato”

$w = \frac{v}{\sigma_v}$; al 95% di probabilità, nell’ipotesi di normalità della distribuzione, dovrà risultare $w \leq 1.96$ [17].

I punti sui quali si eccede la tolleranza verranno scartati nella stima dei parametri. Di essi andrà tenuta memoria in quanto, se ad essi il rilievo di dettaglio si è appoggiato, potrebbero verificarsi deformazioni locali con la necessità di applicare in quelle zone delle “trasformazioni locali”.

Se i punti di doppie coordinate vengono utilizzati per la determinazione o per la verifica delle coordinate dell’origine catastale, occorrerà determinarne gli sqm delle coordinate dalla matrice di covarianza a valle della stima minimi quadrati. La buona determinazione di queste

coordinate è fondamentale nell'applicazione del metodo "per origini": essa dovrà essere cautelativamente $\sigma_{Est} = \sigma_{Nord} \leq 0.2mm * n$ (a titolo di esempio, 40 cm per la scala 1:2000). Anche in questo caso vale quanto sopra specificato per l'analisi dei residui: un esempio di scarti minimi quadrati per la determinazione di una origine catastale è riportato in Figura 21.

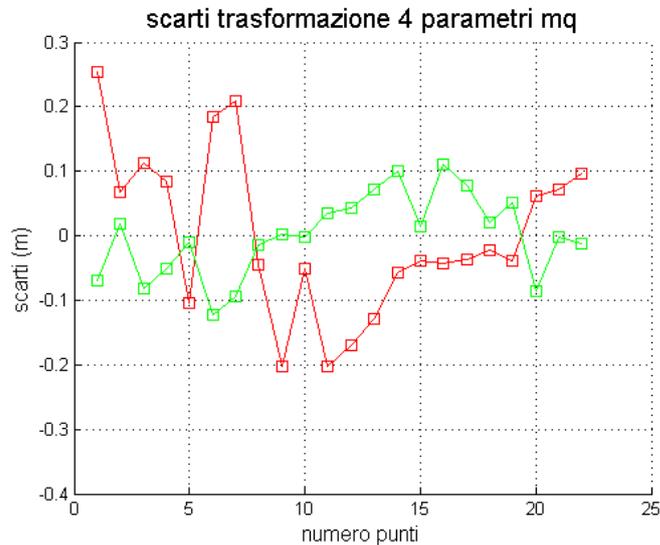


Figura 21 – un esempio di “scarti minimi quadrati” nelle componenti Est (rosso) e Nord (verde), nella rideterminazione di una origine catastale. Si notino i valori limitati nei 30 cm

IV.2.3.2 Le verifiche di qualità sul prodotto finale

Il risultato finale della trasformazione globale di mappe catastali alla cartografia UTM-WGS84, deve essere la “buona sovrapposibilità” alla carta o all’ortofoto di riferimento. Si è già detto come questo risultato dipenda dalla precisione di entrambe le carte e di come questo confronto possa evidenziare deformazioni locali e puntuali su singole entità, ma anche sistematismi comuni ad una o più mappe.



Figura 22 – sovrapposizione della mappa catastale ad una carta tecnica alla scala 1:2000 e valutazione degli scarti su particolari comuni

Se la mappa catastale vettoriale è quella maggiormente usufruibile, il confronto “più significativo” da un punto di vista metrico va eseguito sulla mappe d’impianto. Le mappe vettoriali possono infatti aver subito deformazioni legate al processo produttivo di scansione e vettorializzazione oltrechè essere soggette ad errori nei rilievi di aggiornamento dall’impianto ad oggi. Il confronto tra la mappa d’impianto e la carta di riferimento (un esempio in Figura 22) dovrebbe portare a differenze in planimetria contenute nella tolleranza che include le precisioni sia della mappa catastale che di quella usata come riferimento:

$$T = 2\sqrt{\sigma_{UTM}^2 + \sigma_{CS}^2}$$

Il valore da sottoporre a test sarà:

$$CE95 = 1.7308 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{UTM,i} - E_{CS,i})^2 + (N_{UTM,i} - N_{CS,i})^2}{n}} \leq T$$

Valori superiori vanno analizzati attentamente per valutare se siano relativi a singole entità “mal collocate” o se presentino caratteristiche sistematiche su ampie zone. Di esse va fatta segnalazione all’Agenzia del Territorio.

Un’ulteriore verifica va fatta sul “riattacco” delle mappe catastali, sia all’interno della stessa origine catastale che tra origini adiacenti. Analoga tolleranza va applicata per valutare le discrepanze su particolari omologhi. Valori al di sopra di tale tolleranza e di entità e segno costante, possono rivelare un sistematismo da imputare sia alla restituzione della mappa catastale che ad una possibile imprecisa posizione del centro di emanazione. Entrambe le ipotesi vanno verificate, con l’impiego eventuale di misure sul terreno per la determinazione di punti di doppie coordinate a scopo di verifica. Un esempio di riattacco tra origini adiacenti è riportato in Figura 23.

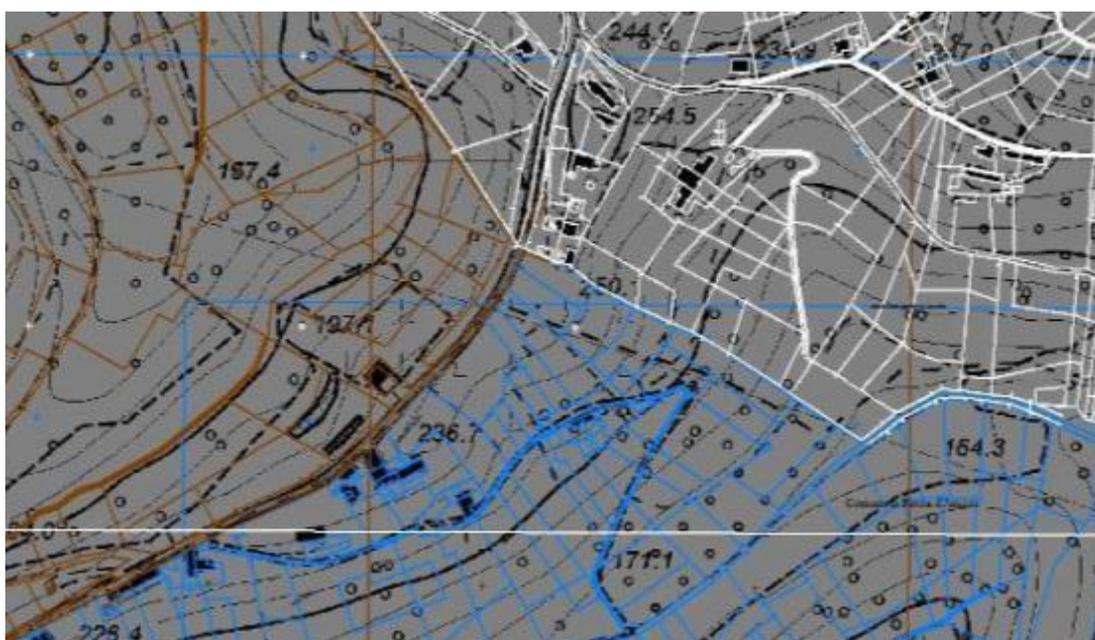


Figura 23 – verifica sul “riattacco” dei fogli di mappa catastale, tra 3 origini adiacenti

V GLOSSARIO, ACRONIMI, BIBLIOGRAFIA

V.1 TIPOLOGIE

V.1.1 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 d'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.

V.1.1.6 Triangolazione di Delaunay

I triangoli che compongono i TIN vengono generalmente definiti, a partire da un insieme di punti quotati, per mezzo di operazioni di triangolazione. Questo processo di creazione di una rete di triangoli può essere effettuato in molti modi diversi e le varie tecniche applicate allo stesso insieme di punti generano, generalmente, maglie triangolari differenti.

Per ottenere i risultati il più possibile omogenei è consigliabile ricorrere ad un unico processo di creazione denominato triangolazione di Delaunay basata sul seguente criterio:

- dato un insieme N di punti sul piano e T una triangolazione,
- $t \in T$ è un triangolo di Delaunay se soddisfa la condizione che il cerchio circoscritto non contenga altri punti di N (Figura 24);
- Se la condizione è soddisfatta da tutti i triangoli la triangolazione è detta di Delaunay.

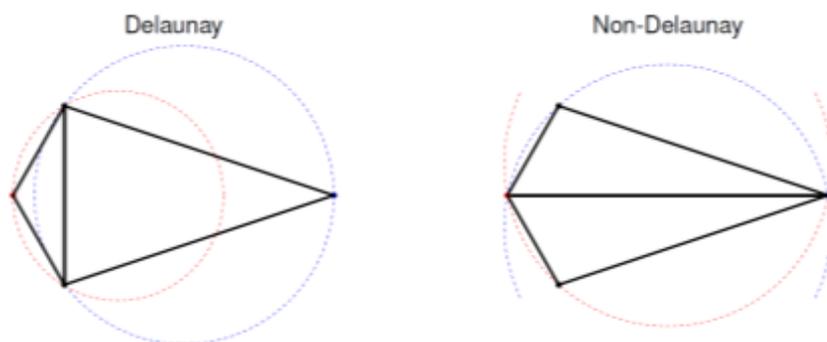


Figura 24 - Triangoli che soddisfano o non soddisfano la condizione di Delaunay

La triangolazione di Delaunay gode di utili proprietà:

- dato un insieme N di punti, la triangolazione di Delaunay è univocamente determinata;

- massimizza il minimo angolo dei triangoli della griglia, in questo modo i triangoli formati tendono ad essere il più possibile equiangoli;
- a meno di configurazioni dei punti molto particolari, non vengono generati triangoli troppo allungati e schiacciati e quindi la maglia tende ad essere regolare, fattore che rende più accurata una successiva operazione di interpolazione;
- È possibile definire, nel corso della creazione, vincoli che condizionano i lati dei triangoli, come *breaklines* ed altro.

V.1.2 TIPOLOGIE DI ORTOFOTO

V.1.2.1 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, taglio 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.1.2.2 In funzione del contenuto

In base al contenuto radiometrico dell'ortofoto digitale è possibile definire le tipologie seguenti.

V.1.2.2.1 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 25a). 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.1.2.2.2 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 25b). 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 radiometrica di ogni componente cromatica varieranno tra 0 (assenza di questo colore) e 255 (colore saturo).

V.1.2.2.3 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 25c) e valgono pertanto le regole descritte per le ortofoto a colori..

V.1.2.2.4 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 ($m*8$ 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.

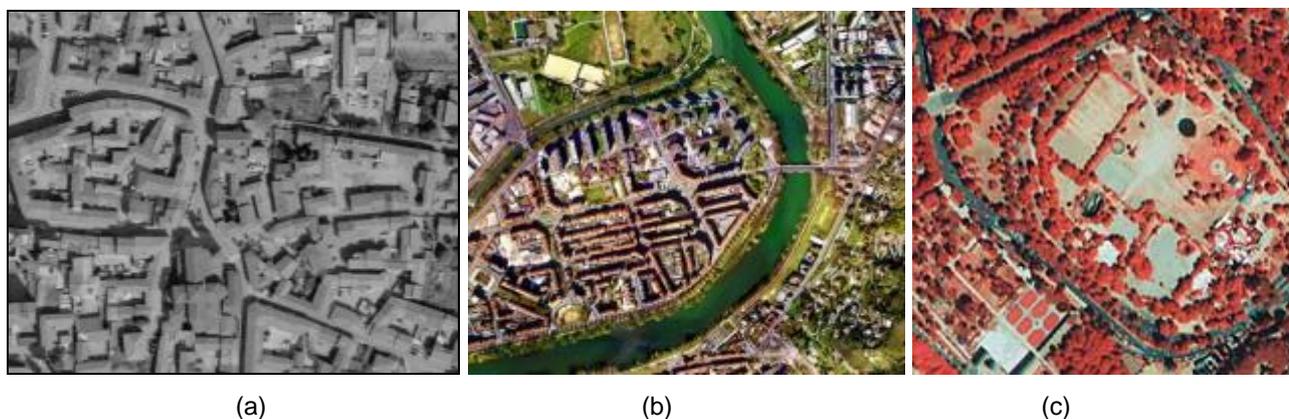


Figura 25 - Un esempio di ortofoto (a) B/N, (b) a colori, (c) in falso colore

V.1.2.3 In funzione dell'accuratezza

Come tutti i dati di tipo cartografico, anche le ortofoto seguono un insieme di regole standardizzate che ne definiscono accuratezza e contenuti. In funzione dell'accuratezza si definiscono le 3 tipologie seguenti.

V.1.2.3.1 Speditiva

Un'ortofoto speditiva è una rappresentazione fotografica del territorio avente caratteristiche di accuratezza 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 un'accuratezzagrafica corrispondente a circa 0.3 mm alla scala nominale dell'ortofoto per gli elementi posti sul terreno e pari acirca 0.9 mm alla

scala nominale dell'ortofoto per gli oggetti o le parti di oggetti (edifici, strade, ponti, viadotti, alberi, ...) 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.1.2.3.2 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, ...) 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,...) e la relativa immagine presente nell'ortofoto.

V.1.2.3.3 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, ...).

Essa viene caratterizzata con un'accuratezza grafica corrispondente a circa 0.2 mm alla scala nominale dell'ortofoto sia per gli elementi posti sul terreno che per gli oggetti o le parti di oggetti (edifici, strade, ponti, viadotti, alberi, ...) 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, ...) contenute in cartografia e la relativa immagine presente nell'ortofoto.

V.2 TERMINOLOGIA

V.2.1 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 l'una un segmento (h) e l'altra una curva (H), come si nota in Figura 26, 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).

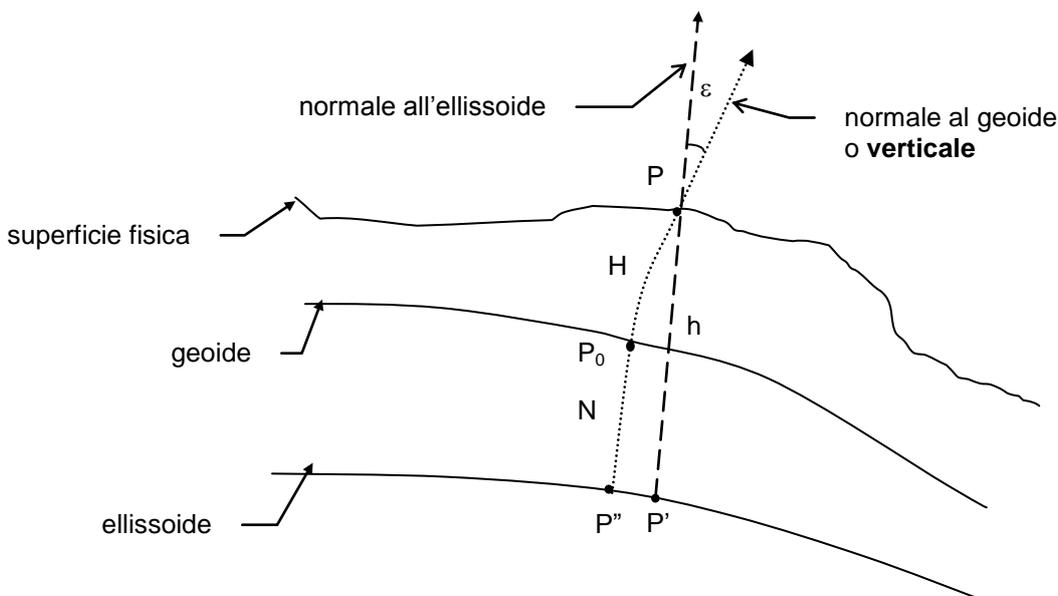


Figura 26 - Altezza ellissoidica, quota ortometrica e ondulazione del geoide

V.2.2 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 varie 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.2.3 HOT-SPOT

Le camere fotogrammetriche digitali montate su piattaforma aerea hanno ormai da tempo soppiantando le camere analogiche comunemente utilizzate fino a pochi anni fa. Le caratteristiche delle camere digitali non seguono più regole e standard comuni (come succedeva nelle camere analogiche) ma sono costruite con sensori, risoluzioni e ottiche molto differenziate tra i vari produttori con soluzioni multi sensore e con geometrie di prese molto diverse dalle soluzioni canoniche in chiave analogica.

Per esempio le camere digitali di tipo *frame* permettono di acquisire immagini aeree utilizzando numerosi sensori sia per acquisire informazioni in varie bande (pancromatico, colori RGB, infrarosso vicino) sia per raggiungere le elevate risoluzioni necessarie alle tradizionali applicazioni fotogrammetriche cartografiche. Ne consegue che l'immagine definitiva viene generata in fase di *post-processing* mettendo insieme le varie immagini acquisite dai molteplici sensori, con tecniche di fusione e *pan-sharpening*.

La parte principale delle camere digitali sono i sensori pancromatici che, inseriti in percorsi ottici regolati da obiettivi con assi non paralleli tra loro, sono spesso inclinati rispetto alla direzione di presa: questa geometria determina spesso l'insorgere di fastidiosi fenomeni di illuminazione variabile tra le varie zone dell'immagine acquisita denominati *hot spot*.

Un *hot spot* è dovuto alla riflessione del sole all'interno del cono angolare definito dall'obiettivo e appare come una porzione dell'immagine digitale sovraesposta, scolorita e con dettagli poco evidenti particolarmente visibile e fastidiosa sull'acqua o sulle zone boschive.

Secondo (Paine, Kiser,2008), la maggior probabilità di ritrovare *hot spot* nelle immagini acquisite si realizza quando la posizione del sole forma, con la direzione dello zenit, un angolo (*solar altitude*) inferiore alla metà dell'angolo di apertura dell'ottica utilizzata (*Field Of View, FOV*), come si può vedere in Figura 27. Si può comprendere che questa situazione si realizza spesso con elevazione solare maggiore di 50-60°, ovvero proprio nel periodo a cavallo del mezzogiorno solare consigliato in tutti i moderni capitolati speciali d'appalto per l'esecuzione di voli fotogrammetrici.

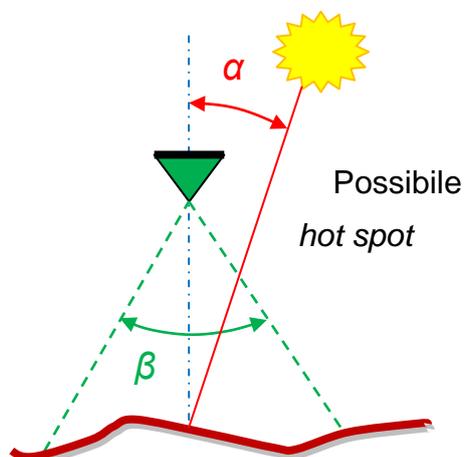


Figura 27 - Lo schema geometrico dell'*hot spot*: α = solar altitude, β = FOV



Figura 28 - Alcuni esempi di *hot-spot*, con i relativi zoom

La Figura 28 mostra alcuni esempi di *hotspot* contenuti in fotogrammi aerei acquisiti con camera fotogrammetrica digitale di tipo *frame* (la DMC di Z/I). Questi effetti sono meno importanti se il volo fotogrammetrico viene utilizzato per la restituzione necessaria alla produzione di cartografia numerica: infatti, nelle zone degradate, i dettagli sono ancora visibili anche se, essendo i bordi radiometrici meno incisi, la precisione delle misurazioni potrà subire un lieve peggioramento.

Il fenomeno degli *hot spot* diviene particolarmente significativo quando si utilizzano i fotogrammi per la produzione di ortofoto digitali. Infatti, la loro presenza genera differenze sostanziali nell'illuminazione della stessa porzione di territorio sui vari fotogrammi che comportano, in fase di mosaicatura, problemi risolvibili solamente mediante tecniche manuali interattive: visto che, come ben noto, la produzione di ortofoto è un procedimento sostanzialmente automatico e quindi poco costoso, l'intervento umano per correggere gli effetti di una errata mosaicatura automatica o ancor peggio per realizzare una mosaicatura manuale "ad hoc" sono spesso insostenibili in termini economici.

V.2.4 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 assunto come riferimento per la grandezza; viene considerata alta quando il valore stimato è molto vicino al valore di riferimento, bassa nel caso opposto.

Viene determinata mediante comparazione tra le osservazioni e il loro valore di riferimento determinato in genere con osservazioni dotate di accuratezza intrinseca più elevata di almeno un ordine di grandezza. 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 29 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'involuppo delle osservazione 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.

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 seguito si suppone che errori grossolani e sistematismi siano stati individuati e rimossi.

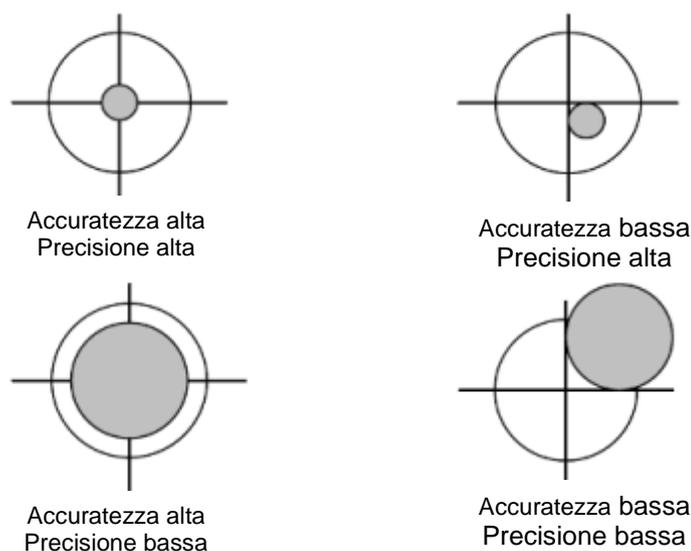


Figura 29 - Accuratezza e precisione

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. E' 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 .

$$P(z_v - u\sigma_z \leq \text{valorevero} \leq z_v + u\sigma_z) = P$$

come indicato nella Tabella 21. 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 21 – Indici di qualità per l'accuratezza di variabile monodimensionale z

Lo sqm 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):

$$P(r, \sigma_x, \sigma_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \iint_{(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2 \leq r^2} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-x_r)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_r)^2}{\sigma_y^2} \right]} dx dy .$$

Per alcuni valori di probabilità P , il raggio r può essere calcolato in funzione delle deviazioni standard σ_x e σ_y (vedi Tabella 22).

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 22 - 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.2.5 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.2.6 CARTA DELLE COPERTURE

La carta delle coperture è una cartografia tematica in cui gli edifici vengono rappresentati mediante il perimetro più esterno delle coperture (gronda) e non con la sezione al piede.

In particolare la carta delle coperture rappresenta esclusivamente:

- le falde di copertura degli edifici (polilinea chiusa);
- l'indicazione della pendenza (blocco, punto con attributo);
- i colmi e le linee di gronda (;
- i tetti piani (polilinea chiusa);
- coperture di tettoie, pensiline;chioschi, edicole, cabine, baracche, ecc. (polilinea chiusa);

- le scale esterne e i balconi aggettanti (per la parte che fuoriesce dalla gronda) (polilinea generalmente aperta);
- le chiome degli alberi (polilinea)
- elettrodotto e linee di trasporto a cavo (polilinea aperta).

Viene generalmente prodotta come tematismo aggiuntivo di una cartografia numerica ordinaria a grande scala.

In Figura 30, è visibile un esempio di carta dei tetti semplificata inerente il comune di Merano, visualizzabile mediante il servizio web INFOMAP in ambiente Gem Browser (accessibile da <http://gis.qvcc.net/gemmeran/index.html>).



Figura 30 - Un esempio di carta dei tetti

V.2.7 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, ...).

Per definizione, quindi, si dice “scala nominale” di una ortofoto la massima scala alla quale la si può “lecitamente” 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'esecrato 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.2.8 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.2.9 COMPRESSIONE

V.2.9.1 il 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.2.9.2 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.2.9.3 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.2.10 SCHEMI SEMPLIFICATI PER ALCUNI FORMATI DI DATI CONSIGLIATI

V.2.10.1 Il formato LAS

Il formato LAS (LASer common data exchange format) è un formato proposto dallo Standards Committee dell'American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) per la memorizzazione dei dati inerenti le acquisizioni LiDAR. I dati possono essere memorizzati in questo formato mediante software specifico (per esempio fornito dai produttori di strumentazione LiDAR) che combina GNSS, IMU e laser range per produrre punti 3D (X,Y,Z). L'intenzione è fornire un formato aperto che permetta ai diversi strumenti di acquisizione e ai software di elaborazione di leggere e scrivere dati LiDAR in un formato comune. Questo formato nasce nel 2002 (versione 1.0) ed è giunto ad oggi alla versione 1.3 (documento "LAS specification, version 1.3 – r11", october 24, 2010, ASPRS).

Il formato LAS garantisce un efficace formato di memorizzazione per i pesanti dati LiDAR in quanto:

- È un formato aperto, completamente noto grazie alle specifiche scritte da ASPRS;
- La sua diffusione sta crescendo nel mondo e sono disponibili anche visualizzatori gratuiti (ad es. LAStools di Martin Isenburg <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/> LP Viewer di QCoherent <http://blog.aggregatedintelligence.com/2009/01/lidar-data-viewers-lp-viewer.html> , MARS Explorer di Merrick and Company, DielmoOpenLiDAR per gvSIG, http://www.dielmo.com/descargas_dielmoopenlidar.php , LAS reader for ArcGIS di GeoCue <http://www.geocue.com/support/utilities.html> ecc.)
- È di tipo binario e usa alcuni accorgimenti che permettono una memorizzazione molto compatta dei dati LiDAR;
- È autoconsistente ed in grado di contenere tutti i dati utili per la memorizzazione dei dati LiDAR (coordinate, impulsi multipli e waveform, tempo GPS, RGB del punto rilevato, ecc.);
- consente anche la memorizzazione dei dati elaborati (punti eliminati, definizione di punti significativi, indicazione classi per ogni punto, descrizione del processo di elaborazione, ecc.);
- Permette la memorizzazione di dati di descrizione (metadati) sia in una forma sintetica già prevista sia grazie a campi definibili dall'utente.

Il formato LAS è costituito da 4 parti:

- Una intestazione (*Public Header Block*, PHB);

- Un insieme semplificato di dati descrittivi (metadati) contenuti nei *Variable Length Records* (VLR) inclusi i descrittori (fino a 255) dei pacchetti di dati contenenti la forma d'onda (*Waveform Packet Descriptors*);
- I dati inerenti i punti acquisiti (*Point Data Record*, PDR);
- I pacchetti di dati inerenti la forma d'onda (*Waveform Data Packets*, WDP) contenuti in una estensione del VLR (*Extended Variable Length Record*, EVLR).

In questo documento non si descrivono le parti legate alla descrizione dei WPD e dei relativi WDP, che possono comunque essere approfondite al documento originale prodotto dall'ASPRS.

L'intestazione (PHB) contiene le informazioni descritte in Tabella 26. Il formato viene espresso in accordo con le specifiche "*ANSI C Language Specification*" (ANSI/ISO/IEC 9899:1999 ("C99")) indicati simbolicamente: *c* = *character* (carattere 1 byte), *u* = *unsigned* (senza segno), *si* = *short integer* (intero corto, 2 byte), *li* = *long integer* (intero lungo 4 byte), *lli* = *long long integer* (intero lungo 8 byte), *f* = *float* (virgola mobile in singola precisione), *d* = *double* (virgola mobile in doppia precisione, 8 byte).

La colonna "R." (richiesto) indica con "*" che il campo deve sempre essere presente. Se il campo non è utilizzato, si può inserire il valore 0. La colonna "nb" indica il numero di byte utilizzati dal campo.

Le coordinate (X_P, Y_P, Z_P) dei punti sono memorizzate mediante *li* (X_{li}, Y_{li}, Z_{li}). All'interno del PHB, oltre a vari metadati descrittivi dei dati registrati, sono presenti i fattori di scala ($X_{scala}, Y_{scala}, Z_{scala}$) e le grandi traslazioni (X_{GT}, Y_{GT}, Z_{GT}) che permettono di calcolare le coordinate reali secondo le formule seguenti:

$$\begin{aligned} X_P &= X_{li} * X_{scala} + X_{GT} \\ Y_P &= Y_{li} * Y_{scala} + Y_{GT} \\ Z_P &= Z_{li} * Z_{scala} + Z_{GT} \end{aligned} \quad \text{Eq. 4}$$

Visto che si utilizzano numerosi campi binari (bit) è necessario ricordare che il format di memorizzazione LAS è di tipo "*Little Endian*": questo significa che data a bit multipli sono memorizzati dal meno significativo all'indirizzo più basso al più significativo all'indirizzo più alto. Per esempio, il bit 0 acceso (1) è uguale a 1, il bit 1 acceso (1) è uguale a 2, il bit 3 acceso è uguale a 4 e così via.

La sezione PHB è seguita da uno o più VLR, il cui numero è specificato nel campo "Numero di VLR". I VLR devono essere letti sequenzialmente dato che la dimensione di ogni VLR è contenuta nell'intestazione di ogni VLR (*Variable Length Record Header*, VLRH). Ogni VLRH ha dimensione di 60 byte. In Tabella 25 è visualizzata la struttura del VLRH.

Si noti che il record con ID utente = "LASF_Spec" e ID record = 65535 corrisponde a un EVLR relativo ai WDP. A differenza di tutti gli altri VLR, questi sono gli unici VLR presenti dopo i PDR.

I dati inerenti i punti rilevati sono memorizzati nei PDR, dopo i VLR.

Tutti i PDR devono essere dello stesso tipo, ad oggi sono state definite 5 tipologie differenti di cui si descriveranno solamente le prime 4:

0. Ha dimensione 20 byte e contiene i campi di base per dati generici (Tabella 27);

1. Ha dimensione 28 byte ed è uguale al tipo 0 con l'aggiunta del campo tempo GPS (Tabella 29);
2. Ha dimensione 26 byte ed è uguale al tipo 0 con l'aggiunta delle informazioni cromatiche (3 canali RGB). Questi dati sono generalmente acquisiti mediante dati ancillari per esempio mediante una camera digitale (Tabella 31);
3. Ha dimensione 34 byte ed è uguale al tipo 2 con l'aggiunta del tempo GPS (Tabella 32).

I tipi 4 e 5 sono legati alla memorizzazione dei dati WDP e non verranno pertanto analizzati.

Bit	campo	Descrizione
0	Origine del tempo GPS	Permette di specificare la modalità di indicazione del tempo GPS 0 (spento): il tempo utilizzato è il <i>GPS Week Time</i> (come nel format LAS 1.2) 1 (acceso): il tempo utilizzato è lo <i>standard GPS Time</i> (ovvero il tempo GPS dei satelliti) meno 1×10^9 (<i>Adjusted Standard GPS Time</i>). Questa traslazione sposta più vicino ad oggi l'origine dei tempi migliorando la risoluzione delle variabili in virgola mobile (float) che descrivono il tempo
1	WDP interni	1 (acceso): I pacchetti di dati inerenti l'intera forma d'onda (<i>waveform</i>) sono inseriti all'interno del file. Questo bit è mutuamente esclusivo con il bit 2
2	WDP esterni	1 (acceso): I pacchetti di dati inerenti l'intera forma d'onda (<i>waveform</i>) sono inseriti in un file ausiliario esterno avente la stessa radice del nome del file LAS ma estensione ".wdp". Questo bit è mutuamente esclusivo con il bit 1
3	Denominazione sintetica del numero di echi	1 (acceso): Il numero di echi per ogni direzione del laser è stato denominato in modo sintetico. Per esempio, questo può essere il caso in cui sia stato generato un unico file composito contenente un file di primo eco e un file di ultimo eco: il primo eco viene denominato "1 di 2" e l'ultimo eco "2 di 2"
4:15	Riservati	Devono essere tutti spenti (0).

Tabella 23 – Significato dei bit del campo a codifica binaria Global Encoding

Generazione	ID sistema
Strumento di acquisizione	Stringa che identifica l'hardware (ad es. "ALTM 1210" o "ALS50"...)
Unione di uno o più file	"MERGE"
Modifica di un singolo file	"MODIFICATION"
Estrazione da uno o più file	"EXTRACTION"

Tabella 24 - Identificazione del sistema

Campo	Descrizione	Var.	nb	R.	Valori
Riservato	-	u si	2		
ID utente	Il nome dell'utente che ha generato il VLR. Se è più corto di 16 caratteri, i restanti devono essere riempiti con il carattere <null>	c[16]	16	*	
ID record	Identificativo del tipo di record	u si	2	*	0÷65535
Lunghezza del record dopo VLRH	La dimensione espressa in byte del VLR dopo la fine del VLRH	u si	2	*	
Descrizione	Opzionale, stringa contenente una descrizione del contenuto del VLR. I caratteri non utilizzati devono essere riempiti con il carattere <null>	c[32]	32		

Tabella 25 - Descrizione dell'intestazione di ogni VLR (VLRH)

nome	Descrizione	Var.	nb	R	Contenuto
Firma del file LAS	Specifica che il file è in format LAS	c[4]	4	*	LASF
ID file sorgente	Identifica un file parte di un progetto LiDAR, permette di gestire fino a 65535 file relativi ad un unico lavoro	u si	2	*	0÷65535
Global Encoding	Indica mediante campi binari alcune proprietà del file (bit di basso livello): il significato è contenuto in Tabella 23	u si	2	*	0÷65535
ID progetto- dato 1	Identificativo del progetto, I parte, non è obbligatorio e può essere compilato a discrezione del software che genera il file	u li	4		0÷4294967295
ID progetto- dato data 2	Identificativo del progetto, II parte, come precedente	u si	2		0÷65535
ID progetto- dato data 3	Identificativo del progetto, III parte, come precedente	u si	2		0÷65535
ID progetto- dato data 4	Identificativo del progetto, IV parte, come precedente	u c[8]	8		"ccccccc"
Versione (principale)	Parte principale dell'indicazione della versione del format LAS, attualmente per la versione 1.3 attuale si indica "1"	u c	1	*	"1"
Versione (secondaria)	Parte secondaria dell'indicazione della versione del format LAS, attualmente per la versione 1.3 attuale si indica "3"	u c	1	*	"3"
Identificazione del sistema	Indicazioni del sistema hardware o della procedura che ha generato il file (Tabella 24)	c[32]	32	*	Tabella 24
Software di generazione	Descrizione della denominazione e versione del software che ha generato il file	c[32]	32	*	Ad es. "TerraScanV-10.8"
Data di creazione (giorno)	Giorno giuliano dell'anno in cui è stato creato il file nel sistema Greenwich Mean Time (GMT)	u si	2	*	1÷366
Data di creazione (anno)	Anno in cui è stato generato il file indicato con 4 cifre	u si	2	*	0÷65535
Dimensione dell'header	Dimensione in byte del PHB, nel caso in cui il software generi dei campi aggiuntivi nel PHB, le specifiche del formato LAS scoraggiano questa pratica permettendo di aggiungere campi e dettagli nel blocco VLR	u si	2	*	In genere, se non sono aggiunti dettagli: 235
Offset dei PDR	Il numero di byte compresi tra l'inizio del file e l'inizio dei dati PDR, deve essere ovviamente aggiornato ogni volta che il software inserisce/toglie metadati in PHB o in VLR	u li	4	*	0÷4294967295
Numero di VLR	Numero di VLR presenti dopo la PHB e prima dei PDR	u li	4	*	1÷4294967295
ID format dei PDR	Identificativo del formato dei point data record. LAS 1.3 definisce le tipologie da 0 a 5	u c	1	*	0-99
Dimensione PDR	Dimensione in byte di un singolo point data record	u si	2	*	0÷65535
Numero di PDR	Numero complessivo di punti (record di point data) registrati all'interno del file	u li	4	*	0÷4294967295
Numero di punti per eco	Contiene un vettore in cui è registrato il numero di punti registrati per ogni eco. Il primo valore contiene il numero di punti registrati per il primo eco, il secondo valore contiene il numero di punti registrati per il secondo eco, e così via fino al quinto eco	u li[5]	20	*	In ogni elemento: 0÷4294967295
Fattore di scala X: X_{scala}	Le coordinate (X_p, Y_p, Z_p) dei punti sono memorizzate mediante $li(X_{lp}, Y_{lp}, Z_{lp})$. Questi campi contengono il fattore di scala che deve essere applicato alle coordinate memorizzate per ottenerne il valore reale in virgola mobile (d) come indicato in (eq. 4)	d	8	*	0 cifre dec.: 0 1 cifra dec.: 0.1 2 cifre dec.: 0.01 3 cifre dec.: 0.001
Fattore di scala Y: Y_{scala}		d	8	*	
Fattore di scala Z: Z_{scala}		d	8	*	
offset X: X_{GT}	La coordinate che deve essere sommata al valore registrato per ottenere il valore reale, corrisponde ad un grande traslazione	d	8	*	-
offset Y: Y_{GT}		d	8	*	
offset Z: Z_{GT}		d	8	*	
Max X	Valori massimi e minimi delle coordinate reali (non scalate nè depurate delle grandi traslazioni) dei punti registrati	d	8	*	-
Min X		d	8	*	
Max Y		d	8	*	
Min Y		d	8	*	
Max Z		d	8	*	
Min Z		d	8	*	
Offset dei WDP	Il numero di byte compresi tra l'inizio del file e l'inizio dei dati WDP	U lli	8	*	0÷(2 ⁶⁴ -1)

Tabella 26 - i campi dell'intestazione (PHB) dei file LAS

Formato 0 del PDR					
Campo	Descrizione	Var.	nb	R.	Valori
X	Questi campi contengono le coordinate dei punti memorizzate mediante $l_i (X_{li}, Y_{li}, Z_{li})$. Per essere trasformate nelle coordinate reali occorre utilizzare i fattori di scala e gli offset contenuti nel PHB mediante le (eq. 4)	l	4	*	-2147483648÷ 2147483647
Y		l	4	*	
Z		l	4	*	
Intensità	Contiene l'ampiezza del laser che ritorna indietro	u si	2		0÷65535
Numero dell'eco	I tre bit di basso livello (0,1,2) contengono il numero dell'eco che corrisponde al punto registrato. Per ogni impulso laser ci possono essere diversi ritorni (echi), il primo ha il numero 1, il secondo il numro 2, e così via fino a 5	3 bit	1	*	1÷5
Numero totale di echi	I tre bit intermedi (3,4,5) contengono il numero totale di echi di ritorno che sono stati registrati per l'impulso laser considerato (al massimo 5)	3 bit		*	1÷5
Direzione scansione	Descrive la direzione dello specchio oscillante dello scanner quando è arrivato l'eco di ritorno	1 bit		*	1: da sinistra verso destra 0: viceversa
Limite delle linea di scansione	Indica se il punto considerato si trova alla fine di una linea di scansione, prima che lo specchio cambi direzione di oscillazione	1 bit		*	0: per un generico punto 1: estremo di lina
Classificazione	Questo campo indica l'attributo "classe" del punto	u c	1	*	0: punto non classificato Codifica binaria, Tabella 28
Direzione del laser	Indica l'angolo (arrotondato all'intero più vicino) da cui il laser è uscito dal sistema di emissione incluso il rollio dell'aereo. Questo angolo è 0 in direzione nadirale, -90 gradi sul lato sinistro dell'aereo rispetto alla direzioen di volo	c	1	*	-90÷+90
User data	Questo campo può essere utilizzato dall'utente a discrezione	u c	1		0÷255
ID origine	Indica l'identificativo del file da cui questo punto è stato originato. I valore numerico corrisponde al ID file sorgente indicato in PHB	u si	2	*	0: il punto è originato in questo file 1÷65535

Tabella 27 - Descrizione del PDR di tipo 0

Bit	Campo	Descrizione
0÷4	Classificazione	La classificazione standard dell'ASPRS è definita nella Tabella 30
5	Sintetico	Il bit è acceso (1) quando il punto è stato creato con tecniche diverse rispetto al LiDAR (per esempio restituzione fotogrammetrica)
6	Key-point	Il bit è acceso (1) quando il punto deve essere considerato un punto molto significativo per il modello altimetrico e quindi non deve essere eliminato in operazioni di sfoltitura
7	Trattenuto	Il bit è acceso (1) quando il punto non deve essere incluso nelle operazioni di trattamento (sinonimo di cancellato)

Tabella 28 – Significato dei bit del campo a codifica binaria Classificazione

Formato 1 del PDR					
Campo	Descrizione	Var.	nb	R.	Valori
X	Questi campi contengono le coordinate dei punti memorizzate mediante $l_i (X_{li}, Y_{li}, Z_{li})$. Per essere trasformate nelle coordinate reali occorre utilizzare i fattori di scala e gli offset contenuti nel PHB mediante le (eq. 4)	l	4	*	-2147483648÷ 2147483647
Y		l	4	*	
Z		l	4	*	
Intensità	Contiene l'ampiezza del laser che ritorna indietro	u si	2		0÷65535
Numero dell'eco	I tre bit di basso livello (0,1,2) contengono il numero dell'eco che corrisponde al punto registrato. Per ogni impulso laser ci possono essere diversi ritorni (echi), il primo ha il numero 1, il secondo il numro 2, e così via fino a 5	3 bit	1	*	1÷5
Numero totale di echi	I tre bit intermedi (3,4,5) contengono il numero totale di echi di ritorno che sono stati registrati per l'impulso laser considerato (al massimo 5)	3 bit		*	1÷5
Direzione scansione	Descrive la direzione dello specchio oscillante dello scanner quando è arrivato l'eco di ritorno	1 bit		*	1: da sinistra verso destra 0: viceversa
Limite delle linea di scansione	Indica se il punto considerato si trova alla fine di una linea di scansione, prima che lo specchio cambi direzione di oscillazione	1 bit		*	0: per un generico punto 1: estremo di lina
Classificazione	Questo campo indica l'attributo "classe" del punto	u c	1	*	0: punto non classificato Codifica binaria, Tabella 28
Direzione del laser	Indica l'angolo (arrotondato all'intero più vicino) da cui il laser è uscito dal sistema di emissione incluso il rollio dell'aereo. Questo angolo è 0 in direzione nadirale, -90 gradi sul lato sinistro dell'aereo rispetto alla direzioen di volo	C	1	*	-90÷+90
User data	Questo campo può essere utilizzato dall'utente a discrezione	u c	1		0÷255
ID origine	Indica l'identificativo del file da cui questo punto è stato originato. Il valore numerico corrisponde al ID file sorgente indicato in PHB	u si	2	*	0: il punto è originato in questo file 1÷65535
Tempo GPS	Contiene il tempo GPS secondo l'origine temporale definita in PHB al campo Global Encoding (bit 0)	d	8	*	-

Tabella 29 - Descrizione del PDR di tipo 1

Valore (bit 0-4)	Significato
0	Creato, mai classificato
1	Non classificato
2	Terreno
3	Vegetazione bassa
4	Vegetazione media
5	Vegetazione alta
6	Edifici
7	Punto a bassa ampiezza (rumore)
8	Punti topograficamente significativi (vette, ecc.)
9	Acqua
10	Riservati per la definizione dell'ASPRS
11	Riservati per la definizione dell'ASPRS
12	Punto sovrapposto, è generalmente un punto eliminato quando si uniscono linee di scansione sovrapposte
13÷31	Riservati per la definizione dell'ASPRS

Tabella 30 – Le classi standard per dati LiDAR secondo l'ASPRS

Formato 2 del PDR					
Campo	Descrizione	Var.	nb	R.	Valori
X	Questi campi contengono le coordinate dei punti memorizzate mediante $l_i (X_{li}, Y_{li}, Z_{li})$. Per essere trasformate nelle coordinate reali occorre utilizzare i fattori di scala e gli offset contenuti nel PHB mediante le (eq. 4)	l	4	*	-2147483648÷ 2147483647
Y		l	4	*	
Z		l	4	*	
Intensità	Contiene l'ampiezza del laser che ritorna indietro	u si	2		0÷65535
Numero dell'eco	I tre bit di basso livello (0,1,2) contengono il numero dell'eco che corrisponde al punto registrato. Per ogni impulso laser ci possono essere diversi ritorni (echi), il primo ha il numero 1, il secondo il numro 2, e così via fino a 5	3 bit		*	1÷5
Numero totale di echi	I tre bit intermedi (3,4,5) contengono il numero totale di echi di ritorno che sono stati registrati per l'impulso laser considerato (al massimo 5)	3 bit	1	*	1÷5
Direzione scansione	Descrive la direzione dello specchio oscillante dello scanner quando è arrivato l'eco di ritorno	1 bit		*	1: da sinistra verso destra 0: viceversa
Limite delle linea di scansione	Indica se il punto considerato si trova alla fine di una linea di scansione, prima che lo specchio cambi direzione di oscillazione	1 bit		*	0: per un generico punto 1: estremo di lina
Classificazione	Questo campo indica l'attributo "classe" del punto	u c	1	*	0: punto non classificato Codifica binaria, Tabella 28
Direzione del laser	Indica l'angolo (arrotondato all'intero più vicino) da cui il laser è uscito dal sistema di emissione incluso il rollio dell'aereo. Questo angolo è 0 in direzione nadirale, -90 gradi sul lato sinistro dell'aereo rispetto alla direzioen di volo	C	1	*	-90÷+90
User data	Questo campo può essere utilizzato dall'utente a discesione	u c	1		0÷255
ID origine	Indica l'identificativo del file da cui questo punto è stato originato. I valore numerico corrisponde al ID file sorgente indicato in PHB	u si	2	*	0: il punto è originato in questo file 1÷65535
Rosso	Intensità della componente cromatica rossa normalizzata ad un valore di 16 bit	u si	2	*	0÷65535
Verde (Green)	Intensità della componente cromatica verde normalizzata ad un valore di 16 bit	u si	2	*	0÷65535
Blue	Intensità della componente cromatica blu normalizzata ad un valore di 16 bit	u si	2	*	0÷65535

Tabella 31 - Descrizione del PDR di tipo 2

Formato 3 del PDR					
Campo	Descrizione	Var.	nb	R.	Valori
X	Questi campi contengono le coordinate dei punti memorizzate mediante $l_i (X_{li}, Y_{li}, Z_{li})$. Per essere trasformate nelle coordinate reali occorre utilizzare i fattori di scala e gli offset contenuti nel PHB mediante le (eq. 4)	l	4	*	-2147483648÷ 2147483647
Y		l	4	*	
Z		l	4	*	
Intensità	Contiene l'ampiezza del laser che ritorna indietro	u si	2		0÷65535
Numero dell'eco	I tre bit di basso livello (0,1,2) contengono il numero dell'eco che corrisponde al punto registrato. Per ogni impulso laser ci possono essere diversi ritorni (echi), il primo ha il numero 1, il secondo il numro 2, e così via fino a 5	3 bit	1	*	1÷5
Numero totale di echi	I tre bit intermedi (3,4,5) contengono il numero totale di echi di ritorno che sono stati registrati per l'impulso laser considerato (al massimo 5)	3 bit		*	1÷5
Direzione scansione	Descrive la direzione dello specchio oscillante dello scanner quando è arrivato l'eco di ritorno	1 bit		*	1: da sinistra verso destra 0: viceversa
Limite delle linea di scansione	Indica se il punto considerato si trova alla fine di una linea di scansione, prima che lo specchio cambi direzione di oscillazione	1 bit		*	0: per un generico punto 1: estremo di linea
Classificazione	Questo campo indica l'attributo "classe" del punto	u c	1	*	0: punto non classificato Codifica binaria, Tabella 28
Direzione del laser	Indica l'angolo (arrotondato all'intero più vicino) da cui il laser è uscito dal sistema di emissione incluso il rollio dell'aereo. Questo angolo è 0 in direzione nadirale, -90 gradi sul lato sinistro dell'aereo rispetto alla direzione di volo	C	1	*	-90÷+90
User data	Questo campo può essere utilizzato dall'utente a discrezione	u c	1		0÷255
ID origine	Indica l'identificativo del file da cui questo punto è stato originato. Il valore numerico corrisponde al ID file sorgente indicato in PHB	u si	2	*	0: il punto è originato in questo file 1÷65535
Tempo GPS	Contiene il tempo GPS secondo l'origine temporale definita in PHB al campo Global Encoding (bit 0)	d	8	*	-
Rosso	Intensità della componente cromatica rossa normalizzata ad un valore di 16 bit	u si	2	*	0÷65535
Verde (Green)	Intensità della componente cromatica verde normalizzata ad un valore di 16 bit	u si	2	*	0÷65535
Blue	Intensità della componente cromatica blu normalizzata ad un valore di 16 bit	u si	2	*	0÷65535

Tabella 32 - Descrizione del PDR di tipo 3

V.2.10.2 File di georeferenziazione di immagini digitali

In alternativa all'utilizzo del formato GeoTIFF, è possibile utilizzare un generico formato per l'immagine digitale (TIF, JPEG, BMP,...) e associare un file avente lo stesso nome dell'immagine digitale ma estensione che termina con la lettera W (TFW, JGW, BPW,...) 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.2.10.3 Formati comuni per la memorizzazione di immagini multi/iper-spettrali

BIL (*Band Interleaved by Line*), BIP (*Band Interleaved by Pixel*) e BSQ (*Band SeQuential*) sono tre metodi molto comuni per la memorizzazione di immagini multi/iper spettrali vista la loro compattezza e semplicità. Nascono più che altro schemi per la memorizzazione i valori dei pixel di un'immagine in un file e supportano immagini a singola banda (bianco e nero, livelli di grigio) o multibanda (RGB, falso colori, multispettrale) con varie tipologie di dati memorizzati (bit, byte, interi, virgola mobile).

I file BIL, BIP e BSQ sono file binari e devono disporre di un file associate in format ASCII denominato header file (*.hdr*) che contiene i dati ancillarinecessari per interpretare correttamente i dati raster contenuti, come per esempio il numero di righe e il numero di colonne dell'immagine, il GSD, i parametri per la georeferenziazione, il numero di bande memorizzate, e quant'altro.

Nel formato BIL i valori radiometrici dei pixel sono memorizzati banda per banda per ogni riga (*line*) dell'immagine a partire dal pixel in alto a sinistra (1,1). Per esempio, data una immagine RGB (3 bande), si scrivono tutte le tre bande per la riga 1, di seguito si scrivono tutt le tre bande della riga 2 e via così fino al numero totale di righe dell'immagine, come visibile in Figura 31.

	Colonne (1-numero colonne)	Colonne (1- numero colonne)	...	Colonne (1- numero colonne)
Riga n. 1	Banda 1	Banda 2	...	Ultima banda
Riga n. 3	Banda 1	Banda 2	...	Ultima banda

Ultima riga	Banda 1	Banda 2	...	Ultima banda

Figura 31 - Schema del formato BIL

Il format BIP è simile al format BIL, ad eccezione che i dati sono memorizzati banda per banda per ogni pixel a partire dal pixel in alto a sinistra nell'immagine (1,1). Per esempio, per una immagine RGB, si scrivono i valori delle 3 bande per il pixel di riga 1 e colonna1, di seguito i valori delle 3 bande per il pixel di riga 1 e colonna 2, e così via percorrendo tutte le colonne e scorrendo tutte le righe dell'immagine. La Figura 32 rappresenta questo formato.

	Pixel colonna 1				Pixel colonna 2				...	Pixel ultima colonna			
Riga n. 1	b.1	b.2	...	b.n	b.1	b.2	...	b.n	...	b.1	b.2	...	b.n
Riga n. 3	b.1	b.2	...	b.n	b.1	b.2	...	b.n	...	b.1	b.2	...	b.n

Ultima riga	b.1	b.2	...	b.n	b.1	b.2	...	b.n	...	b.1	b.2	...	b.n

Figura 32 - Schema del formato BIP

Il formato BSQ memorizza le informazioni radiometriche una banda per volta. In altre parole, si memorizzano, nell'ordine, i valori radiometrici di tutti i pixel relativi alla banda 1, di seguito i valori radiometrici di tutti i pixel relativi alla banda 2, e così via fino alla fine del numero di bande utilizzate.

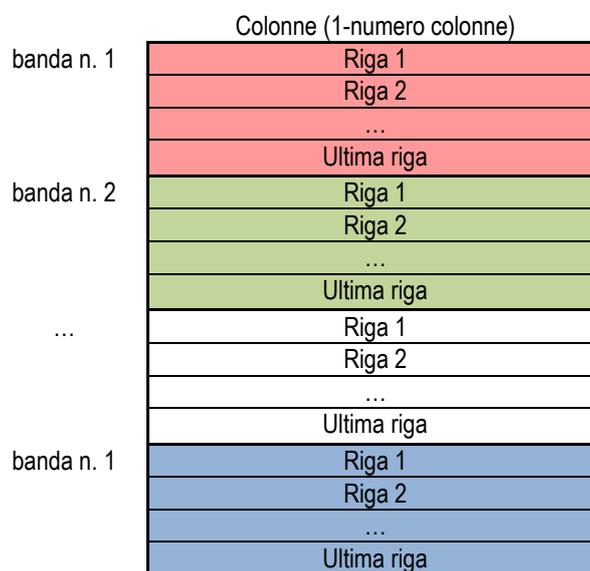


Figura 33 - Schema del formato BSQ

Ai file BIL, BIP o BSQ deve sempre essere associato un file descrittivo (*header*) di tipo testuale (ASCII) avente lo stesso nome dei file contenenti l'immagine ma estensione `.hdr`.

Esso contiene una serie di elementi che descrivono ognuno un particolare attributo delle immagini, indicati nel formato `<nome dell'attributo><valore dell'attributo>`. Gli attributi possono essere inseriti in qualunque ordine, ma ognuna deve essere inserito in una riga separata. Le righe che non iniziano con un `<nome dell'attributo>` definito vengono ignorate durante la lettura.

Gli attributi più significativi sono indicati nella Tabella 33. Si noti che possono essere presenti campi numerici (per es. `lines` e `sample`), campi testuali in cui la stringa è memorizzata tra parentesi grafe (ad es. `description`), campi multipli composti da varie parti con separatore virgola (ad es. `pixel size` o `Map info`)

Nome	descrizione	Tipo di valore
description	Descrizione dei dati	{ testo di descrizione } Es.: description = { DDSM Regione Piemonte sezione 112010}
nrows lines	Numero di righe	Intero
ncols sample	Numero di colonne	Intero
nbands	Numero di bande memorizzate	Intero
nbits	Numero di bits per ogni pixel per banda	1, 4, 8, 16, 32
byte order	Ordine d'importanza dei byte	I = intel, M = motorola
layout interleave	Organizzazione dei dati	BIL, BIP, BSQ
xdim	Dimensione del pixel in ascissa	Ogni numero reale
ydim	Dimensione del pixel in ordinata	Ogni numero reale
ulxmap	Coordinata x del centro del pixel in alto a sinistra nella matrice dei dati	Ogni numero reale
ulymap	Coordinata y del centro del pixel in alto a sinistra	Ogni numero reale
pixel size	Campo multiplo alternativo a xdim e ydim, Indica le dimensioni del pixel (dx, dy) in ascissa e in ordinata e indicazione dell'unità di misura (units=...)	{dx, dy, units=Meters} Es. Pixel size = {0.20, 0.20, units=Meters}
Map info	Campo multiplo alternativo a ulxmap e ulymap. Contiene l'indicazione per la georeferenziazione, in cui si indicano: <ul style="list-style-type: none"> - La proiezione (UTM, ...); - Gli indici di riga e di colonna che individuano il pixel di cui si conoscono le coordinate (ncp, nrp) - Coordinate del pixel di posizione nota (Xp, Yp) - Dimensione del pixel (dx, dy) - Il fuso di appartenenza f - L'emisfero e (North o South) - L'unità di misura (Units = ...) 	{proiezione, ncp, nrp, Xp, Yp, dx, dy, f, e, datum, units=Meters} Ad esempio Map info = {UTM, 1.000, 1.000, 645.000, 1540.200, 0.20000, 0.20000, 32, North, European 1950, units=Meters}

Tabella 33 - i campi del file header per i formati BIL, BIP e BSQ

V.3 ACRONIMI

ADS	<i>Aerial Digital Scanner</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASTER	<i>Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
ATBD	<i>Algorithm Theoretical Basis Document</i>
B/N	Bianco eNero
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CE90	<i>Circular Error al 90 % di probabilità</i>
CE95	<i>Circular Error al 95 % di probabilità</i>
CGIAR	<i>Consultative Group for International Agricultural Research</i>
CISIS	Centro Interregionale per il Sistema Informatico ed il Sistema Statistico
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
CNIPA	Centro Nazionale per l'Informatica nella Pubblica Amministrazione
COFA	Comando Operativo Forze Armate
CP	<i>Check Point</i>
CSI	<i>Consortium for Spatial Information</i>
CT	Carta Tecnica
CTR	Carta Tecnica Regionale
DAS	<i>Digital Aerial Scanner</i>
DCT	<i>Discrete Cosine Transformation</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DIMAC	<i>Digital Modular Aerial Camera</i>
DMC	<i>Digital Modular Camera</i>
dpi	dot per inch, unità di misura della risoluzione
DSM	<i>Digital Surface Model</i>
DSS	<i>Digital Sensor System</i>
DTED	<i>Digital Terrain Elevation Data</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>
DN	<i>Digital Number</i>
DWT	<i>Discrete Wavelet Transformation</i>
DXF	<i>Data Exchange Format</i>
ECW	<i>Enhanced Compressed Wavelet</i>
ED1950	<i>European Datum 1950</i>
EGM96	<i>Earth Gravity Model 1996</i>
ENAV	Ente Nazionale d'Assistenza al Volo
ETRF	<i>European Terrestrial Reference Frame</i>
ETRS	<i>European Terrestrial Reference System</i>
FMC	<i>Forward Motion Compensation</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GEOTIFF	<i>GEOraphic Tagged Image File Format</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRASS	<i>Geographic Resources Analysis Support System</i>

gon	unità di misura di un angolo nel sistema centesimale
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
ICC	<i>International Color Committee</i>
IGM	Istituto Geografico Militare
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
IR	<i>InfraRed</i>
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory (Pasadena, USA)</i>
LE90	<i>Linear Error al 90% di probabilità</i>
LE95	<i>Linear Error al 95% di probabilità</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LP DAAC	<i>Land Process – Distributed ActiveArchiveCenter</i>
LZW	<i>Lempel-Ziv-Welch</i>
MCP	<i>Map Control Point</i>
MTF	Funzione di Trasferimento della Modulazione
NGA	<i>National Geospatial-intelligence Agency</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
NIR	<i>Near InfraRed</i>
OS	Ortofoto solida
OSO	Ortofoto solida ordinaria
OSP	Ortofoto solida di precisione
OSS	Ortofoto solida speditiva
PDOP	<i>Position Dilution Of Precision</i>
RC	Rapporto di Compressione
RDN	Rete Dinamica Nazionale
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RPC	<i>Rational Polynomial Coefficients</i>
RPF	<i>Rational Polynomial Functions</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SIR-C	<i>Spaceborn Imaging Radar</i>
sqm	scarto quadratico medio (σ)
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TDI	<i>Time Delay and Integration</i>
TFW	<i>TIFF World File</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
TIFF	<i>Tagged Image File Format</i>
TP	<i>Tie point</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
VNIR	<i>Visible and Near InfraRed</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>
X-SAR	<i>X-band Synthetic Aperture Radar</i>

V.4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

V.4.1 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'inquadramento 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
[Floodwww.asprs.org/society/committees/lidar/Downloads/Vertical_Accuracy_Reporting_for_Lidar_Data.pdf](http://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.shtm (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] ASPRS Standards Committee, (2010). *LAS Specification, Version 1.3 - R11*", http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_3_r11.pdf
- [14] 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
- [15] Brovelli M. A., Crespi M., Cilloccu F., Dequal S., Lingua A. (2009). *Ortoimmagini 1:10000 e modelli altimetrici: linee Guida*, pubblicato a cura del CISIS

V.4.2 LIBRI

- [16] Barbarella M., Radicioni F., Sansò F (2009), *Lo sviluppo della tecnologia per le reti geodetiche*. Pubblicato a cura del CISIS, Perugia, 2009. 217 pag. ISBN:978-88-904629-0-0
- [17] Cina A., (2002), *Trattamento delle misure topografiche*. Torino, CELId, 2002. 126 pag. ISBN: 88-7661-534-2
- [18] Autori Vari, (2004), *Manual of photogrammetry, Fifth edition*, ed. ASPRS
- [19] Kauss K. (1997), *Photogrammetry - Advanced methods and applications*(vol.2), Ferd Dümmler Verlag-Bonn
- [20] Kraus K., traduzionee integrazioni S. Dequal (1998), *Fotogrammetria*, L&B Torino
- [21] Pàroli, A., 1948. *Triangolazioni topografiche e del Catasto*. Milano, Hoepli, 1948.
- [22] Maune D.F (2007), *Digital Elevation Model Technologies and Applications: the DEM Users Manual, 2nd Edition*, ed. ASPRS
- [23] 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.
- [24] Paine D.P., Kiser J. D. (2003), *Aerial Photography and Image Interpretation, 2nd Edition*", Ed. Wiley, 143-146
- [25] Autori vari, curato da Shan J., Toth C.K. (2008), "*Laser Ranging And Scanning - Principles and Processing*", ed. Taylor & Francis Group, LLC.

V.4.3 ARTICOLI

- [26] Agosto E., Lingua A. (2007), *L'ortofoto solida di precisione a grandissima scala in ambito urbano*, In: XI conferenza nazionale ASITA, ASITA (ITA), Torino
- [27] 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
- [28] 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.

- [29] 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.
- [30] Benciolini B., Biagi L., Crespi M., Manzano 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 l'e-government
- [31] Bendea, H., Cina, A., De Agostino, M., Manzano, A., Piras, M., Porporato, C., 2009. *La ricomposizione dei piccoli sistemi d'asse catastali nel sistema WGS84*. Atti della 13° Conferenza nazionale ASITA, Bari, 1-4 dicembre 2009.
- [32] Biasion A., Dequal S., Lingua A. (2004), *A new procedure for the automatic production of true orthophotos*, in IAPRS, Vol. XXXV
- [33] Borgefors G., (1986) *Distance Transformations in Digital Images*, CVGIP(34), No. 3, pp. 344-371.
- [34] Borgefors G., (1988), *Hierarchical chamfer matching: A parametric edge matching algorithm*, IEEE Trans. on PAMI, vol. 10, No. 6, 1988, pp. 849- 865
- [35] Brovelli M.A., Zamboni G. (2003). *Procedure automatiche per l'integrazione di diverse basi cartografiche*. Atti della 7° Conferenza nazionale ASITA, Verona, ottobre 2003.
- [36] 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.
- [37] Brovelli M.A., Caldera S., Liu X., 2009, "3D comparison of DTMs without the use of homologous points", 6th International Symposium on Digital Earth (<http://www.isde6.org>), Beijing, 12-15 settembre 2009, Atti del Convegno su CD.
- [38] Brovelli M.A., Liu X., Sansò F., "Local Detection of Three-dimensional Systematic Errors in Satellite DSMs: Case Studies of SRTM and ASTER in Lombardy", Proceedings of the 2nd International ICST Conference on Personal Satellite Services, ISBN: 978-963-9799-88-2, 2010 (atti su CD)
- [39] 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
- [40] Crespi, M., Reina, G. (2004). *Inquadramento di mappe catastali nel sistema cartografico UTM-WGS84 – ETRF8 mediante rilievi GPS RTK rispetto a stazioni permanenti*. Atti dell'8° conferenza ASITA, Roma, 2004.
- [41] 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 "Optical3D Measurement Techniques", Zurich, Switzerland, 9-12 July, Vol. I, pp. 223-232
- [42] 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
- [43] Dequal S., Lingua A. (2002), *L'ortofoto di precisione del Comune di Torino*, Atti VI conferenza nazionale ASITA
- [44] Dequal S., Lingua A., Rinaudo F. (2001), *Ortofoto digitale di precisione*, Bollettino SIFET, supplemento al n. 2/2001

- [45] Di Filippo S., (2003). Sul passaggio delle coordinate plano-cartografiche al sistema WGS84 e viceversa. *Rivista dell'Agencia del Territorio*, 2003
- [46] Flotron A. , KölblO. (2000), *Precision Terrain Models for Civil Engineering*, OEEPE Publication, P 32-134
- [47] Förstner, W., (1986), *A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching*, IAPRS, Vol. 26, Part3/3, pp. 150-166
- [48] Galetto R. (2006), *Camere digitali per riprese aeree e terrestri*, Atti Conferenza Nazionale ASITA
- [49] 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
- [50] Greenwalt, C.R., SchultzM.E. (1968), *Principles and Error Theory and Cartographic Applications*, ACIC Technical Report No. 96: St. Louis, Mo., Aeronautical Chart and Information Center, , 89 p.
- [51] 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
- [52] 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
- [53] Haest B., Biesemans J., Horsten W., Everaerts J., Van Camp N., Van Valckenborgh J. (2009), "Radiometric calibration of digital photogrammetric camera image data", ASPRS 2009 Annual Conference, Baltimore, Maryland " March 9-13, 2009
- [54] Lingua A., Maschio P. (2010). *Riconoscimento e correzione automatica di fenomeni di hot spot in camere digitali aeree*. Atti della 14° Conferenza nazionale ASITA, Mantova
- [55] Maas H. G. (1996), *Automatic DEM generation by multi-image feature based matching*, IAPRS Vol. 31, Part B3, pp. 484-489
- [56] Pàroli, A., 1943, Il problema della trasformazione delle coordinate nella rappresentazione conforme di Gauss e l'unificazione delle reti trigonometriche del nuovo stato. *Rivista del Catasto e dei Servizi Tecnici Erariali*, n. 3, 1943. pp. 213-227.
- [57] 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
- [58] Sun M. W, Zhanga J. Q., (2008), "Dodging research for digital aerial images", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing (China) 349-353
- [59] Surace, L., 2004. La georeferenziazione delle informazioni territoriali. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, vol. III, n.6, pp.168-179.

V.4.4 SITI INTERNET

- [60] <http://www.applanix.com/>
- [61] <http://www.digitalglobe.com>
- [62] <http://www.dimacsystems.com/>
- [63] <http://www.geoeye.com>
- [64] <http://www.imagesatintl.com>
- [65] <http://www.intergraph.com/photo/ia.aspx>
- [66] <http://www.jena-optronik.com/cps/rde/xchg/optronik>
- [67] <http://www.jpeg.org/jpeg2000f>
- [68] <http://www.leica-geosystems.com/>
- [69] <http://www.nrsa.gov.in>
- [70] <http://www.remotesensing.org/geotiff/spec/geotiffhome.html>
- [71] <http://www.spotimage.fr>
- [72] <http://www.vexcel.com/>
- [73] <http://www.vingeo.com/das.html>
- [74] <http://www.wehriassoc.com/>
- [75] <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>
- [76] <http://blog.aggregatedintelligence.com/2009/01/lidar-data-viewers-lp-viewer.html>
- [77] http://www.dielmo.com/descargas_dielmoopenlidar.php
- [78] <http://www.geocue.com/support/utilities.html>
- [79] <http://gis.gvcc.net/gemmeran/index.html>