

Prescrizioni Tecniche per la produzione di Modelli Digitali del Terreno

(Versione 16I del 29 Aprile 2001 – Documento finale del Gruppo di Lavoro)

0. Introduzione: termini di riferimento del Gruppo di Lavoro e finalità del documento.	5
1. Generalità sui DTM.....	6
1.1. Elementi base di un DTM e principi di interpolazione.	7
1.2. Generazione dei dati per un DTM a livello nazionale.	8
1.2.1 Determinazione della distanza tra i nodi della griglia.	9
1.2.2. Breaklines e linee caratteristiche.	10
1.3. Sistema di riferimento e di coordinate.....	11
1.4. Formato di scambio dei dati.....	11
1.4.1. Metadati.....	11
1.4.2. Formato dei modelli a griglia (raster).....	12
1.4.3. Formato dei dati vettoriali.	13
1.5. Diffusione ed accesso ai dati.....	14
2. Considerazioni sui requisiti di precisione di un DTM.	14
2.1. Considerazioni su errori e tolleranze.	14
2.1.1. Errori accidentali.	14
2.1.2. Errori sistematici.....	15
2.1.3. Tolleranze planimetriche.	15
2.2. Considerazioni pratiche sul livello di definizione del terreno.	16
2.3. Standard di precisione adottati in altre nazioni.....	16
2.4. Standard di precisione altimetrica adottati nelle Carte Tecniche Italiane.....	17
2.5. Requisiti di un DTM per la produzione di ortofoto.	23
3. Rassegna dei DTM attualmente disponibili in Italia.	25
3.1. Il DTM prodotto dall’Istituto Geografico Militare.	25
3.2. Dati di altezza provenienti dalle Carte Tecniche Regionali.....	28
3.3. Il DTM della Compagnia Generale Ripreseeree	30
4. Standard di precisione per i DTM.	31
4.1. Standard di precisione di un DTM per la produzione di ortofoto.	31
4.2. Standard di precisione di un DTM per la pianificazione e gli studi ambientali.	32
4.3. Descrizione dei Livelli di Precisione.	34
4.3.1. Specifiche per il livello 0.....	34
4.3.2. Specifiche per il livello 1.....	34
4.3.2. Specifiche per il livello 2.....	35
4.3.4. Specifiche per il livello 3.....	35
4.3.5. Specifiche per il livello 4.....	36
4.3.6. Specifiche per il livello 5.....	37
5. Tecnologie e metodi di produzione.	38
5.1. Il controllo di qualità.....	38
5.2. L’inventario dei dati già disponibili.....	39
5.3. Digitalizzazione di cartografia al tratto preesistente.....	40
5.3.1. Digitalizzazione delle curve di livello.	40
5.3.2. Digitalizzazione dei punti quotati.....	41

5.3.3. Digitalizzazione degli elementi lineari.....	41
5.3.4. Generazione del grigliato regolare del DTM.	41
5.3.4. Controllo di qualità del processo di digitalizzazione.....	41
5.4. Acquisizione dati per i DTM per via fotogrammetrica.....	42
5.4.1. Generalità sull'impiego della fotogrammetria.....	42
5.4.2. Fasi di lavoro nella produzione del DTM per via fotogrammetrica	42
5.4.3. Pianificazione delle fasi del lavoro e del controllo di qualità.....	43
5.4.4. Piano di volo e distribuzione dei punti di appoggio	44
5.4.5. Volo di ripresa	46
5.4.6. Controllo di qualità dei fotogrammi	46
5.4.7. Determinazione dei punti di appoggio.....	46
5.4.8. Triangolazione aerea.....	47
5.4.9. Scansione dei fotogrammi	48
5.4.10. Compensazione della triangolazione aerea e controllo di qualità	48
5.4.11. Acquisizione dati per il DTM.....	49
5.4.11.1. Generazione automatica del DTM:.....	50
5.4.11.2. Generazione del DTM da misure stereo	50
5.4.12. Completamento del rilievo in campagna e controllo di qualità.....	51
5.4.13. Trasformazione dei dati nel formato standard del DTM	51
5.5. Impiego del LIDAR nell'acquisizione di dati per i DTM	51
5.5.1. Descrizione del sistema e modalità operative.....	52
5.5.2. Caratteristiche dell'acquisizione dati con LIDAR.....	53
5.5.3. Determinazione e selezione dei punti appartenenti al terreno.....	54
5.5.4. Pianificazione delle fasi del lavoro e controllo di qualità	55
5.5.5. Calibrazione del sistema	55
5.5.6. Progetto del piano di volo.....	55
5.5.7. Standard di esecuzione del rilievo	57
5.5.8. Aree di controllo	58
5.5.9. Stazioni di riferimento GPS a terra.....	59
5.5.10. Elaborazione dei dati	59
5.5.11. Sistema di riferimento e di coordinate.....	59
5.5.12 Documenti ed elaborati da consegnare	60
6. Riflessioni sui costi.	62
7. Raccomandazioni per i futuri sviluppi e la gestione dei DTM in Italia.	64
7.1. Considerazioni economiche sul completamento dei DTM regionali.....	64
7.2. Gestione dei DTM regionali.	65

<u>Tabella 1 - Passo di griglia da adottare in funzione della precisione altimetrica del DTM.....</u>	<u>9</u>
<u>Tabella 2: Tolleranze delle CTR prodotte in formato numerico (a cura dell'ing. De Paris).</u>	<u>19</u>
<u>Tabella 3 - Precisione richiesta al DTM per la produzione di ortofoto</u>	<u>22</u>
<u>Tabella 4 Livelli di precisione del DTM prodotto dall'I.G.M.</u>	<u>24</u>
<u>Tabella 5: Quadro della CN e dei DTM nelle Regioni (a cura del Dr. Cumer)</u>	<u>28</u>
<u>Tabella 6: Precisione richiesta al DTM per la produzione di ortofoto</u>	<u>30</u>
<u>Tabella 7: Quadro dei livelli di precisione e relative specifiche tecniche</u>	<u>31</u>
<u>Tabella 8: Quadro dei livelli di precisione, principali applicazioni e sorgenti di dati</u>	<u>31</u>
<u>Tabella 9: Indicazioni di massima sui prezzi per la produzione di DTM</u>	<u>61</u>

Prescrizioni Tecniche per la produzione di Modelli Digitali del terreno

0. Introduzione: termini di riferimento del Gruppo di Lavoro e finalità del documento.

L'Intesa Stato-Regioni ha previsto la definizione di prescrizioni tecniche comuni, da adottarsi nella produzione di data base topografici composti principalmente da ortofoto, modelli digitali del terreno (DTM) e dati vettoriali, destinati alla pianificazione territoriale e alla protezione dell'ambiente. E' stato costituito un Gruppo di Lavoro sotto la direzione del Prof. Otto Kölbl allo scopo di elaborare specifiche per un modello digitale del terreno destinato principalmente alla produzione di ortofoto alla scala 1:5.000 e 1:10.000 ma anche ad altre finalità nell'ambito della pianificazione e gestione del territorio. Queste specifiche definiscono anzitutto i requisiti di un modello digitale del terreno; prendono poi in esame le diverse tecniche di produzione, in particolare l'impiego di dati altimetrici esistenti, alla luce delle prescrizioni tecniche con cui sono stati generati.

Una prima versione di queste "Prescrizioni Tecniche", dal titolo "Specifiche per i DTM" è stata elaborata nel corso del 2000. Il testo è il risultato delle discussioni in seno al Gruppo di Lavoro, al cui interno hanno collaborato principalmente le seguenti persone:

Prof. Otto Kölbl, EPF, Lausanne, Switzerland, Presidente del Gruppo di Lavoro;

Dr. Luigi Di Bello, Segretario del Comitato Tecnico di Coordinamento (CTC);

Ten. Col. Gennaro Afeltra, I.G.M.;

Dr. Adriano Cumer, Centro Interregionale, Roma;

Ing. Giordano De Paris, Provincia di Trento;

Geom. Marco D'Orazi, Comune di Genova;

Prof. Gianfranco Forlani, Università di Parma;

Geom. Carlo Giaggio, Regione Veneto;

Geom. Antonio Laraia, Regione Basilicata;

Prof. Luigi Mussio, Politecnico di Milano;

Presidente del Comitato Tecnico di Coordinamento è l'Ing. Carlo Cannafoglia, Direttore dell'Agenzia per il Territorio.

La prima versione del documento è stata redatta in inglese dal Prof. Kölbl; la corrispondente versione in italiano, redatta da un traduttore, è stata parzialmente rivista dal Prof. Forlani. Nel corso del gennaio e febbraio 2001 essa è stata sottoposta all'esame dei rappresentanti e consulenti delle Regioni, delle Associazioni Scientifiche e Professionali nonché delle Ditte del settore. Sono stati ricevuti un gran numero di osservazioni e contributi, per i quali il Gruppo di Lavoro è grato agli estensori.

I commenti ricevuti hanno messo in luce che gli standard in vigore nella produzione delle Carte Tecniche Regionali sono più elevati di quelli assunti nella prima versione del documento e sono compatibili con la produzione di ortofoto di alta qualità. E' comunque evidente che, a lungo termine, standard ancora più elevati saranno richiesti ai dati topografici (ed in particolare a quelli destinati alla descrizione del terreno) per soddisfare i requisiti della progettazione e costruzione di opere e manufatti, del controllo delle inondazioni e di altri aspetti della protezione ambientale e pianificazione territoriale. Pertanto le specifiche iniziali sono state modificate, in modo da non ridurre gli standard attualmente impiegati, cosa che avrebbe dato un'indicazione di evoluzione degli standard stessi nella direzione sbagliata.

Si è inoltre cercato di tener conto del potenziale delle nuove tecniche di acquisizione dati (in particolare i laser a scansione aviotrasportati) e di fornire indicazioni relative a standard di precisione ancora più elevati, poichè essi sono necessari per le zone a rischio di inondazione, la progettazione di opere d'ingegneria e la produzione di ortofoto a grande scala.

1. Generalità sui DTM.

Per definizione un modello digitale delle altezze è un insieme di dati che permette il calcolo per interpolazione della quota di un punto arbitrario del terreno con precisione assegnata. In questo senso, quindi, il DTM si distingue nettamente dalle curve di livello di una carta. Una curva di livello fornisce informazioni di quota solo lungo la linea stessa; inoltre il disegno delle curve di livello deve far percepire la morfologia del terreno (terreno liscio: linee con debole curvatura; terreno molto ondulato: linee con forte curvatura, ecc.). Le curve di livello devono rappresentare piccoli dettagli geomorfologici con la loro tipica forma, rendendoli immediatamente percepibili. Questo richiede talvolta l'accentuazione di certe forme del terreno. Le

curve di livello sono quindi destinate principalmente alla visualizzazione del terreno, mentre i dati per la produzione di un DTM sono destinati a fornire informazioni di quota sull'intero territorio rappresentato, in un formato adatto al trattamento numerico con calcolatore. Le curve di livello derivate da un DTM non mostreranno pertanto la morfologia del terreno allo stesso modo di quelle disegnate dal restituitista .

1.1. Elementi base di un DTM e principi di interpolazione.

I dati necessari per un DTM sono costituiti da un seminato di punti e da linee caratteristiche del terreno come le linee di rottura (breaklines, linee che uniscono i punti del terreno caratterizzati da brusche variazioni di pendenza), le creste, gli impluvi, le delimitazioni di aree non incluse nel DTM (le cosiddette "zone morte") e, infine, i limiti dell'area rappresentata.

In genere la quota di un punto viene ottenuta per interpolazione lineare tra punti adiacenti; molti software permettono inoltre l'interpolazione bi-cubica o impiegano tecniche di Collocazione (dette anche di Predizione o Kriging). Vengono anche adottate tecniche di interpolazione basate sul calcolo di medie ponderate, che non sono tuttavia raccomandabili per queste applicazioni. La Collocazione o l'impiego di medie pesate permettono un certo grado di regolarizzazione dei dati originari di misura, che tuttavia è adottato raramente nella pratica. Non è infatti così evidente che sia davvero necessario "lisciare" i dati per descrivere l'andamento del terreno, quando ci si limita ad un campionamento piuttosto rado. Diverso è il caso in cui le tecniche di acquisizione effettuano un sostanziale sovracampionamento del terreno (come con il laser a scansione) e si deve allora operare uno sfoltimento dei punti rilevati.

Quando si adottano interpolazioni bilineari o bicubiche tra punti adiacenti, si procede per interpolazione con funzioni a supporto limitato, ad elementi finiti. La maggior parte dei pacchetti software per DTM impiega i triangoli come elementi finiti, il che presuppone una triangolazione dei dati originari. Viene cioè definito un insieme di triangoli i cui vertici sono i punti misurati. Molto spesso si impiega il metodo di triangolazione di Delaunay; in questo caso i triangoli sono definiti in modo che il cerchio circoscritto ad ogni triangolo non contenga altri punti del seminato. All'interno di questo triangolo si interpola in genere bilinearmente e, in qualche caso, con funzioni bicubiche. I triangoli formati dalla triangolazione non devono attraversare linee caratteristiche o breaklines. Le spezzate che descrivono linee caratteristiche o breaklines sono sempre impiegate come lati di triangoli ed i loro vertici come punti nella generazione del DTM.

Non si ritiene qui di raccomandare specifici prodotti software per l'elaborazione dei dati del DTM, essendo tuttora forte lo sviluppo nel settore. Inoltre la tendenza è ad impiegare programmi integrati, che permettono la manipolazione di dati GIS, l'elaborazione di immagini e la manipolazione del DTM entro un'unica applicazione. Questo aspetto è già assai evidente, ad esempio, nei programmi per la costruzione di strade. Del tutto diverso è il discorso che riguarda il trattamento dei dati acquisiti con laser a scansione, dove occorre fissare criteri per lo smussamento e lo sfoltimento dei dati. Pertanto la raccomandazione esplicita di un prodotto software potrebbe essere controproducente e limitativa in diverse applicazioni.

1.2. Generazione dei dati per un DTM a livello nazionale.

Nel progettare un DTM a livello nazionale, oltre al livello di precisione da raggiungere, occorre definire la disposizione dei punti nel seminato e le prescrizioni per le linee caratteristiche da includere nel DTM. I punti del seminato sono in genere disposti in forma regolare (ai vertici di una griglia, con spaziatura uniforme in direzione N-S ed E-O). 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 DTM. Allo stato attuale delle prestazioni hardware, quando si supera il milione di punti si riscontrano in genere problemi considerevoli di gestione. Questo significa che i dati originari di misura, che possono essere consegnati in un formato irregolare (TIN - Triangulated Irregular Network, rete irregolare di triangoli), sotto forma di densa griglia di punti (come quella originata da un laser aviotrasportato) o come sequenza di curve di livello in forma numerica, devono essere riportati in un formato standard, ovvero una griglia regolare di quote che deve essere integrata da break lines od altre linee caratteristiche; il formato dei dati prescrive come questi devono essere disposti in specifici files, la suddivisione del territorio in zone e la documentazione relativa ai dati (metadati).

Tenendo presenti le caratteristiche del terreno ed il livello di precisione, il parametro fondamentale da fissare è pertanto il passo di griglia; una semplice interpolazione bilineare all'interno della griglia dovrebbe infatti essere sufficiente a rispettare i limiti di precisione previsti. Il livello di precisione e la finalità principale per cui il DTM viene prodotto determineranno inoltre quali linee caratteristiche devono essere incluse.

1.2.1 Determinazione della distanza tra i nodi della griglia.

Di seguito vengono discussi i criteri per la determinazione della distanza tra i nodi della griglia del DTM. In questo contesto, devono essere presi in considerazione i seguenti aspetti:

1. La spaziatura della griglia deve essere sufficientemente densa da permettere di descrivere in modo accurato l'andamento del terreno senza richiedere breaklines, tranne in corrispondenza di vere e proprie discontinuità del terreno. Questa spaziatura deve essere adeguata a trattare tutti i tipi di terreno (ondulato ed anche accidentato).
2. La spaziatura non deve essere troppo densa, altrimenti la gestione del gran numero di punti (da 100.000 a 10.000.000, a seconda del software) diventa problematica. Una spaziatura elevata è evidentemente adatta per i livelli di precisione più bassi. Al contrario, quando si impiegano dati da altimetro laser per un DTM di alta precisione, si impone una riduzione mirata dei dati. Di seguito viene pertanto raccomandato 5 m come valore minimo della distanza tra i nodi della griglia.
3. Livelli diversi di precisione richiedono differenti distanze tra i nodi della griglia, tuttavia è bene cercare di conservare la coincidenza tra griglie fitte e rade, per facilitare la fusione di insiemi di dati. Un insieme di dati con passo di griglia di 10 m che copra una porzione di un altro insieme con passo di griglia di 20m può essere facilmente sovrapposto a quest'ultimo, dal momento che un dato ogni due si trova in posizione coincidente con la griglia più fitta e può quindi essere eliminato. Al contrario, l'integrazione entro una griglia con spaziatura di 25 m richiederebbe un'interpolazione, per identificare quali punti eliminare nella griglia meno fitta.

Sono stati effettuati numerosi studi per giungere ad indicazioni sulla distanza tra i nodi della griglia da adottare in relazione alla precisione richiesta per il DTM. I valori di seguito riportati sono basati su un precedente studio di Ackermann e adattati sulla base di un recente studio dell'OEEPE (A. Flotron and O. Kölbl: Precision Terrain Models for Civil Engineering, OEEPE Publication, P 32-134, December 2000). In Tabella 1, che sintetizza i risultati dello studio, sono riportate le indicazioni sulla distanza di griglia in funzione del tipo di terreno (piano, ondulato, accidentato) e della precisione desiderata. Si raccomanda di adottare come riferimento i valori per terreno ondulato.

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

Tabella 1 – Distanza tra i nodi della griglia, in funzione del tipo di terreno, da adottarsi per ottenere una assegnata precisione altimetrica del DTM

In funzione del livello di precisione, si possono pertanto adottare i seguenti passi di griglia, che sono nella maggior parte dei casi adeguati anche a terreni accidentati:

- **precisione in quota tra $\pm 0.15\text{m}$ e $\pm 1\text{m}$: passo della griglia 5m;**
- **precisione in quota tra $\pm 1\text{ m}$ e $\pm 2.5\text{m}$: passo della griglia 10m;**
- **precisione in quota $\pm 3\text{m}$ ed inferiore: passo della griglia 20m; (sarebbe possibile impiegare spaziature maggiori per precisioni inferiori a $\pm 7\text{m}$ ed oltre; tuttavia per semplicità di gestione dei dati si raccomanda di conservare un passo di 20m).**

1.2.2. Breaklines e linee caratteristiche.

Il seminato o la griglia di punti rappresentano adeguatamente l'andamento del terreno quando esso è regolare, ma non sono in grado di riprodurre, se non in modo alquanto approssimato, particolari elementi del territorio, come le scarpate, i rilevati, gli argini, le cave. Pertanto, è necessario rappresentare tali elementi mediante breaklines o linee caratteristiche, qualora essi diano luogo, entro la maglia della griglia, ad una discontinuità del terreno superiore ad una data soglia.

Aree rilevate con precisione inferiore, per la presenza di vegetazione o altri ostacoli, devono essere messe in evidenza; altrettanto va fatto per quelle che non possono essere rilevate. Per precisioni superiori al metro si devono infine contornare le aree (come edifici, specchi d'acqua, ecc.) che non devono essere prese in considerazione nel calcolo del DTM.

1.3. Sistema di riferimento e di coordinate.

I dati di un DTM sono riferiti ad un sistema di riferimento geodetico e, normalmente, la planimetria è espressa in coordinate cartografiche. Attualmente, per i DTM esistenti in Italia sono impiegati: il sistema ED50 nella rappresentazione UTM per il DTM dell'I.G.M. e il sistema Roma40 nella rappresentazione Gauss-Boaga per i DTM delle Regioni.

E' in corso di elaborazione da parte del Gruppo di Lavoro "Reti plano-altimetriche" un documento apposito: si faccia riferimento ad esso per la scelta del sistema di riferimento del DTM nazionale, che, comunque, deve coincidere con quello definito dalla rete dei punti noti presenti nell'area.

Se possibile, una revisione della rete dei punti noti dovrebbe precedere ogni nuova attività di rilievo.

1.4. Formato di scambio dei dati.

I dati del DTM sopra descritti devono essere memorizzati e resi disponibili all'utente in un formato adatto. 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 DTM, 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 DTM del proprio territorio. Per quanto riguarda i dati vettoriali (breaklines, linee di struttura del terreno e di delimitazione delle "zone morte") si suggerisce che siano memorizzati nel formato DXF di Autodesk. Inoltre è necessario associare al DTM i relativi "Metadati", ovvero la descrizione del livello di precisione, la zona cui si riferiscono i dati nei files, ecc. .

Vanno quindi distinti 3 insiemi di dati:

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

Si raccomanda di limitare le dimensioni dei files di dati così da avere blocchi relativamente semplici da maneggiare. Si suggerisce che ogni file rappresenti una zona di forma quadrata, o approssimativamente tale, contenente da 1 a 5 milioni di punti.

1.4.1. Metadati.

I metadati devono contenere un indice che permetta di individuare automaticamente

i files relativi ad una certa area di lavoro. Inoltre devono fornire indicazioni sul livello di precisione dei dati, il produttore, il sistema di riferimento e di coordinate, ecc. A mo' di esempio, i seguenti parametri (ma altri potrebbero essere aggiunti) dovrebbero costituire i Metadati per una certa zona:

File_Head

Parte che viene ripetuta per ciascuna zona o foglio

Testo libero

Modello Digitale del Terreno prodotto dall'I.G.M.

Copyright.....

No_Break_lines oppure nome_file_breaklines

Dati provenienti da sezioni 1:25.000, ultima revisione 1995

Sistema di Riferimento: ED50

Rappresentazione cartografica: UTM

Origine dei dati:

Software impiegato per la generazione dei dati

Costanti

n_colonne	500
n_righe	500
x_vertice_inf_sx	660010
y_vertice_inf_sx	5100010
dimensione di una cella	2.0000000000000000E+0001
valore convenzionale per dato non valido	9999
vertice_sup_sx	660010 5109990 798
vertice_sup_dx	669990 5109990 930
vertice_inf_sx	660010 5100010 1200
vertice_inf_dx	669990 5100010 1430
Livello_di_Precisione	0
Sigma_in_m	15
I.G.M._Foglio_1:50.000_Numero	1230
Fuso	2

End_Of_File

Poiché anche altri dati raster (es. ortofoto) o i dati vettoriali del DB topografico devono essere documentati con metafile, si suggerisce di adottare i contenuti informativi comuni per tutti questi metadati.

1.4.2. Formato dei modelli a griglia (raster).

Come già detto, diversi enti in Italia adottano il formato GRID-ASCII per la memorizzazione dei modelli a griglia: di seguito se ne riporta la descrizione, tratta da un documento della Provincia Autonoma di Trento:

Formato dei files di consegna del DTM (formato GRID).

Ogni file di consegna, in formato Grid-Ascii, contiene una porzione di DTM (unità di memorizzazione), pari al rettangolo d'ingombro di una sezione alla scala 1:10.000 - taglio ED 50.

Ogni file viene, così, indentificato dal numero della corrispondente sezione ed ha un nome del tipo: *fffss0.asc*, dove *fff* rappresenta il codice del foglio 1:50.000 ed *ss* la sezione 1:10.000 (da 01 a 16).

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 Gauss-Boaga (espresse in metri - doppia precisione) del primo vertice (XLLCORNER, YLLCORNER) o, in alternativa, del primo punto (XLLCENTER, YLLCENTER), in basso a sinistra dell'unità di memorizzazione,
4. la dimensione della cella (CELLSIZE)
5. il valore corrispondente alla quota non significativa (in genere NODATA = -9999).

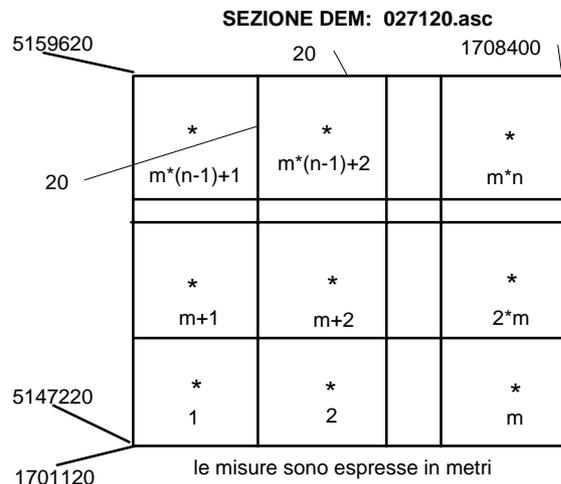
Segue la matrice delle NROWS x NCOLS quote del modello, separate da uno *spazio* (" "); i valori delle quote sono rappresentate in metri con al più due decimali (singola precisione); il separatore decimale è il *punto* (".").

Per esempio:

```

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

```



I files possono essere organizzati secondo i fogli della cartografia, come nel precedente esempio, o secondo altri tipi di suddivisione, attualmente in discussione presso il Gruppo di Lavoro che si occupa dei database topografici.

1.4.3. Formato dei dati vettoriali.

I dati vettoriali (breaklines, creste ed impluvi, aree da non rappresentare nonché i limiti dell'area rappresentata) possono essere memorizzati in varie forme. Un formato piuttosto diffuso, come già ricordato, è il formato di scambio DXF di Autodesk. Si raccomanda comunque di impiegare formati di scambio ed estensioni delle aree rappresentate identici a quelli adottati per i dati vettoriali.

I diversi elementi (tipo di breakline, tipo di linea caratteristica) devono essere differenziati impiegando layer diversi. Per i dettagli nella codifica si faccia riferimento nuovamente alle specifiche relative ai dati vettoriali.

1.5. Diffusione ed accesso ai dati.

Si propone di rendere disponibili i dati su Internet, per assicurarne il più ampio accesso e la loro possibile aggregazione (si vedano in proposito anche le raccomandazioni al Cap. 7). I dati dovrebbero essere memorizzati secondo quanto previsto per i formati di scambio ed includere i metadati sia per la descrizione dei dati sia per la localizzazione dei files. Le modalità di accesso ai dati dovrebbero essere definite dal Comitato Tecnico di Coordinamento dell'Intesa Stato-Regioni (CTC).

2. Considerazioni sui requisiti di precisione di un DTM.

In questo paragrafo ci si propone di individuare indicazioni sulla precisione richiesta al DTM in alcune applicazioni. A partire da considerazioni generali sul tipo di terreno e sulle possibilità tecniche di rilievo, incluse le esperienze di altre nazioni, ci si concentrerà poi sulle prescrizioni attualmente in uso per la produzione di cartografia in Italia. Da questo esame emerge la raccomandazione per l'adozione di 6 diversi livelli di precisione del DTM, che coprono l'intervallo di precisioni da $\pm 15\text{cm}$ a $\pm 10\text{m}$.

2.1. Considerazioni su errori e tolleranze.

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

2.1.1. Errori accidentali.

Per tutte le considerazioni relative agli errori verrà usata nel seguito la deviazione standard o scarto quadratico medio (abbreviato con sqm oppure σ ; i corrispondenti valori verranno preceduti dal simbolo “ \pm ”) che ha associata una probabilità d'errore pari al 68%. Una probabilità d'errore del 95% si ottiene invece moltiplicando lo sqm per 2. La tolleranza (solo lo 0.3% degli errori può superare questo valore) è in generale assunta pari a 3 volte lo sqm . Quanto sopra assume pertanto una distribuzione normale o gaussiana degli errori.

In pratica non osserviamo sempre una tale distribuzione degli errori. Errori grossolani, che superano la soglia della tolleranza, sono presenti con frequenza maggiore di quella attesa e dobbiamo inoltre accettare l'esistenza di componenti sistematiche (bias). **Si deve pertanto ammettere che il limite di 3σ possa essere superato dall'1% dei punti di controllo** (ciò significa, ad esempio, che può essere superato 10 volte quando si esaminano 1000 punti di controllo o 1 volta quando se ne impiegano 100).

2.1.2. Errori sistematici.

Oltre a quella per gli errori accidentali è importante definire una tolleranza per gli errori sistematici. Nelle discussioni con gli ingegneri civili si sente spesso dire che nella progettazione stradale un errore di 10 cm non è accettabile perchè corrisponde a X mc di volume di terreno, ecc. Tuttavia la componente accidentale varia da punto a punto e l'errore nei punti circostanti può già compensarne l'effetto. Questo non accade per le componenti sistematiche, derivanti da errori nell'orientamento del modello in fotogrammetria, da errori nei punti di inquadramento per le misure con strumentazione topografica, ecc. Le componenti d'errore sistematico sono quelle più temibili nelle attività che interessano movimenti di terra o deflusso di acque. **Pertanto, si prescrive che la componente sistematica non debba superare 1/2 dello scarto quadratico medio.** Presi n punti di controllo, si calcoleranno la media campionaria m (che esprime la stima della componente sistematica) e la stima della deviazione standard $\sigma(0)$ della popolazione delle differenze sui punti di controllo. In una distribuzione normale gli errori sono raggruppati attorno alla media della distribuzione. La precisione di stima di m può allora essere calcolata, per la legge di propagazione della varianza, sulla base del numero n di osservazioni e della deviazione standard $\sigma(0)$:

$$\sigma(m) = \sigma(0) / \text{SQRT}(n)$$

La componente sistematica m calcolata sui punti di controllo non dovrà superare 1/2 della deviazione standard delle differenze; per l'affidabilità della verifica la media dovrà essere calcolata su una serie di almeno 20 punti di controllo successivi.

2.1.3. Tolleranze planimetriche.

L'obiettivo principale del presente documento è fornire dei limiti per gli errori in quota. Tuttavia ogni punto quotato deve possedere un riferimento planimetrico. In terreni piani la correttezza della sua localizzazione è ininfluenza sulla rappresentazione del terreno; essa diventa tuttavia sempre più importante in aree collinari. La precisione planimetrica necessaria può essere derivata dalla pendenza del terreno. Il discorso è invece differente per le breaklines che definiscono i bordi di

una strada o di un argine. Per assicurare l'appropriata coincidenza tra l'elemento planimetrico ed il corrispondente punto quotato è necessario che la precisione planimetrica dei punti sia la medesima richiesta per le cartografie alle corrispondenti scale o, in un sistema informativo geografico, quella delle basi di dati con cui il DTM interagisce; dovrebbe inoltre essere tenuta in considerazione la pendenza del terreno, se questo porta ad un valore più restrittivo della precisione planimetrica.

2.2. Considerazioni pratiche sul livello di definizione del terreno.

Il terreno naturale non è in effetti liscio e non può essere misurato con precisione illimitata. Occorre considerare che i campi vengono arati e che il terreno può gonfiarsi quando assorbe umidità in seguito alla pioggia. In linea di massima si può assumere che un terreno accidentato non possa essere misurato con precisioni superiori a $\pm 10 - \pm 15$ cm, in relazione anche alla tipologia dell'area. Precisioni più elevate possono essere ottenute su superfici con particolari caratteristiche di levigatezza come strade, tetti, ecc. Dal momento che queste prescrizioni si riferiscono principalmente al suolo, dobbiamo considerare questo come l'elemento di riferimento, pur sapendo che, ad esempio nella costruzione di strade e manufatti, si richiedono misure con precisioni molto più elevate (dell'ordine del cm, del mm o perfino superiori) lungo strade esistenti o sulle relative infrastrutture (ponti, gallerie, canalizzazioni).

2.3. Standard di precisione adottati in altre nazioni.

Per ragioni pratiche non è tuttora possibile adottare ovunque i livelli di precisione più elevati per un DTM, i costi sarebbero insostenibili. Pertanto da sempre le prescrizioni sulla precisione vengono adeguate alle possibilità tecniche e alle risorse finanziarie a disposizione, assicurando il soddisfacimento dei requisiti per la maggior parte delle applicazioni.

Un criterio assai diffuso per stabilire le prescrizioni sulle quote, venne fissato agli inizi del secolo scorso dal topografo Koppe per la Carta Tecnica della Germania alla scala 1:5.000 (Deutsche Grundkarte), allora redatta alla scala 1:10.000. Egli fissò, per una quota derivata da curve di livello, la precisione :

$$\sigma (h) = \pm (0.3 + 3 * \text{tg } \alpha) \quad [\text{m}]$$

dove α è l'inclinazione del terreno. A quel tempo era possibile ottenere tale precisione con uno sforzo ragionevole. Egli tuttavia non fu in grado di ottenere, dalle varie categorie di utilizzatori, specifiche ben definite. Parecchi "Länder" in Germania non furono poi in grado di rispettare questi valori, specie in zone coperte da foreste. Solo di recente, impiegando il laser a scansione, si riesce a raggiungere tali precisioni

anche in aree edificate e con vegetazione; in qualche caso, in condizioni particolari, si ottengono addirittura valori migliori. Solo con densa vegetazione, specialmente con prevalenza di conifere, si resta ancora al di sopra. Ad esempio la Baviera sta eseguendo il rilievo di gran parte del suo territorio con altimetro laser richiedendo uno sqm in quota di $\pm 0.25\text{m}$ in terreno aperto e $\pm 0.50\text{m}$ nelle foreste.

Regioni alpine come la Svizzera hanno richiesto precisioni inferiori. Per la carta base 1:5.000 o 1:10.000 si prescrive una precisione (errore quadratico medio) di:

$$\sigma (h) = \pm (1.0 + 3 * \text{tg } \alpha) \quad [\text{m}]$$

Queste carte sono servite in buona parte come base per l'elaborazione della carta 1:25000, che venne poi usata per derivare un modello digitale del terreno per l'intera nazione. La precisione di questo modello è di $\pm 2\text{m}$ nella zona settentrionale (la parte più pianeggiante del paese), di $\pm 5\text{m}$ nella regione montuosa e di $\pm 10\text{m}$ nelle zone di alta montagna (Alpi). Attualmente è in produzione un nuovo DTM ottenuto con altimetro laser; diverse misure di controllo mostrano una precisione analoga a quella riscontrata in Baviera: $\pm 0.3\text{m}$ in terreno aperto e $\pm 0.5\text{m}$ nelle foreste. Le misure con laser sono state limitate alle aree al disotto di 2000 m s.l.m.

La Federal Emergency Management Agency degli USA ha emanato direttive e prescrizioni per l'impiego di laser a scansione nell'acquisizione di dati di altezza per creare DTM da impiegare nella modellazione idraulica di zone soggette ad inondazioni, carte numeriche del terreno e altri prodotti richiesti nell'ambito del National Flood Insurance Program (NFIP). Si afferma in tali raccomandazioni che "la precisione in quota del DTM deve in ogni caso assicurare il rispetto di un errore quadratico medio di $\pm 15\text{cm}$, sia in terreno aperto sia nelle aree ricoperte dalle categorie di vegetazione predominanti nelle zone studiate".

2.4. Standard di precisione altimetrica adottati nelle Carte Tecniche Italiane.

In Italia la maggior parte delle Regioni ha adottato prescrizioni assai dettagliate nella redazione delle carte tecniche, incluse quelle relative a curve di livello e punti quotati. Molte sono ispirate alle raccomandazioni della Commissione Geodetica Italiana, pubblicate in due documenti nel 1973 e nel 1976:

- Commissione Geodetica Italiana, Norme proposte per la formazione di carte tecniche alle scale 1:5.000 e 1:10.000. Istituto Geografico Militare, Firenze, 1973;
- Commissione Geodetica Italiana: La Formazione di Cartografie Generali a Grande Scala (1:2000, 1:1000), Guida per le scelte Tecniche ed Economiche, Editrice "La Strada", Milano, 1976.

Le seguenti tolleranze t , ricavate dai documenti sopra citati, si riferiscono ad una probabilità d'errore del 95%, ovvero a 2 volte lo σ :

Scala della carta 1:10.000:	$t_{(cl)} = 3.5 \text{ m}$	$t_{(\text{punti quotati})} = 1.8 \text{ m}$	$\Delta_{(cl)} = 10 \text{ m}$
Scala della carta 1:5.000:	$t_{(cl)} = 2.2 \text{ m}$	$t_{(\text{punti quotati})} = 1.2 \text{ m}$	$\Delta_{(cl)} = 5 \text{ m}$
Scala della carta 1:2.000:	$t_{(cl)} = 0.9 \text{ m}$	$t_{(\text{punti quotati})} = 0.6 \text{ m}$	$\Delta_{(cl)} = 2 \text{ m}$
Scala della carta 1:1.000:	$t_{(cl)} = 0.6 \text{ m}$	$t_{(\text{punti quotati})} = 0.4 \text{ m}$	$\Delta_{(cl)} = 1 \text{ m}$
Scala della carta 1:500:	$t_{(cl)} = 0.4 \text{ m}$	$t_{(\text{punti quotati})} = 0.25 \text{ m}$	$\Delta_{(cl)} = 0.5 \text{ m}$

(cl) = curve di livello;

$\Delta_{(cl)}$ = equidistanza

I valori di cui sopra si riferiscono a terreno aperto, mentre per zone con densa vegetazione si ammette una tolleranza (sempre al 95% di probabilità) pari a metà dell'altezza degli alberi. La tolleranza per gli errori nelle coordinate planimetriche di un punto ben definito è di 0.4 mm grafici. L'equidistanza delle curve di livello è pari ad 1/1000 del denominatore della scala mentre in terreni poco pendenti sono richieste curve ausiliarie.

In seguito diverse Regioni adottarono nei capitolati prescrizioni proprie che tuttavia, come si evince dalla tabella 2, seguono in buona sostanza le indicazioni della CGI. Nel confrontare i valori va tenuto presente se la tolleranza fa riferimento a 2σ o a 3σ .

	Regione	Scala	Referente	Tp (m) Planimetria	Th (m) Punti quotati	Tcl (m) Punti su curve di livello	Td (m) Errore nella distanza tra 2 punti	Tq (m) Errore nel dislivello tra 2 punti	
1	Toscana C.N. - 2σ	1:10.000	Pelacani	3,00	1,80	3,5 → P. Media ≤ 5% 4,0 → P. Media > 5%			
2	Prov. Trento ¹ C.N. - 2σ	1:10.000	Di Cesare	3,00	1,80	3,5 → P. Media ≤ 5% 4,0 → P. Media > 5%	3,00+d/1000 → d≤1200 4,20 → d>1200	1,80+d/1000 → d≤700 2,50 → d>700	
3	Piemonte ² C.Digital. - 2σ	1:10.000	Garnero	tpmedia ≤ 2.5 tpmax ≤ 4					
4	Veneto ³ C.N. - ca 2σ (err. max 3%)	1:5.000	Fondelli	2,00	1,20	2,00	2,00+d/1000 → d≤800 2,80 → d>800	1,20 → d≤200 1,40 → 200<d≤1000 1,60 → 1000<d	
5	Emilia Romagna ⁴ C.N. - 2σ	1:5.000	Dequal	2,00	1,20 ----- 2,00 h edifici	2,20	2,00+d/1000 → d≤800 2,8 → d>800		
6	Prov. Trento ⁵ C.N. - 2σ	1:2.000	Di Cesare	0,60 ----- 0,90	0,60 ----- 0,90	1,20	0,60+d/1000 → d≤300 0,90+d/1000 → d>300 ----- 0,90+d/1000 → d≤300 1,20+d/1000 → d>300	0,60+d/1000 → d≤300 0,90+d/1000 → d>300 ----- 0,90+d/1000 → d≤300 1,20+d/1000 → d>300	
7	Lombardia ⁶ C.N. - 2σ	1:2.000	Galetto	0,80 ----- 1,20	0,25 ----- 0,40		1,00+d/1000 ----- 1,60	0,40 ----- 0,60	
8	Piemonte C.N. - 2σ	1:1.000	Dequal ?	0,40	0,30 ----- 0,40 h edifici	0,50	0,30+d/1000 → d≤300 0,60 → d>300	0,30+d/1000 → d≤200 0,50 → d>200	
9	Lombardia ⁷ C.N. - 2σ	1:1.000	Galetto	0,30 ----- 0,50	0,15 ----- 0,25		0,40+d/1000 ----- 0,70	0,25 ----- 0,40	

Tabella 2: Tolleranze delle CTR prodotte in formato numerico (a cura dell'ing. De Paris).

¹ In zone coperte da vegetazione la tolleranza $tcl=2m$ deve essere aumentata di metà dell'altezza delle piante.

² Le tolleranze planimetriche $tpmedia$ e $tpmax$ sono riferite al supporto di input.

³ In zone coperte da vegetazione la tolleranza tcl deve essere aumentata di metà dell'altezza delle piante.

⁴ In zone coperte da vegetazione la tolleranza tcl deve essere aumentata di metà dell'altezza delle piante.

⁵ Le tolleranze indicate nella sezione superiore si riferiscono a punti certi; quelle nella sezione inferiore ai rimanenti punti.

In zone coperte da vegetazione la tolleranza tcl deve essere aumentata di metà dell'altezza delle piante.

⁶ Le tolleranze indicate nella sezione superiore si riferiscono ai punti certi; quelle nella sezione inferiore ai rimanenti punti.

In fase di collaudo vengono restituite ex-novo le curve di livello della zona campione: le curve ripetute non devono intersecare le curve adiacenti della carta.

⁷ Le tolleranze indicate nella sezione superiore si riferiscono ai punti certi; quelle nella sezione inferiore ai rimanenti punti.

Le tolleranze di cui sopra non permettono di dedurre direttamente la precisione di un DTM derivato da una carta tecnica restituita in forma numerica. Lo sqm dei punti appartenenti a curve di livello per le carte 1:10.000 varia da ± 1.7 a ± 2 m (Toscana, Provincia Autonoma di Trento, Piemonte). Bisogna inoltre aggiungere un errore di interpolazione, difficile da valutare. In condizioni ideali, possiamo affermare che questo errore non dovrebbe superare il 50% dello sqm dei punti appartenenti alle curve di livello. Questo significa che un DTM derivato da una CTR 1:10.000 dovrebbe avere una precisione (sqm) pari a $\sigma_{(DTM)} = \pm 2.0$ m in terreno aperto. Con vegetazione densa la tolleranza è in genere $\frac{1}{2}$ della altezza degli alberi ovvero $\frac{1}{4}$ in termini di sqm (1σ). Introducendo nuovamente un coefficiente di riduzione per tener conto degli errori di interpolazione, si perviene ad $\frac{1}{3}$ dell'altezza degli alberi, ovvero ad una precisione del DTM di ± 7 m per alberi alti circa 20m.

Mentre per aree con densa vegetazione il limite resta comunque ± 7 m, estendendo questo ragionamento alle altre scale otterremmo per la precisione di un DTM in terreno aperto i seguenti valori :

Carta alla scala 1:10.000:	$t_{(cl)} = 3.5$ m	$\Delta_{(cl)} = 10$ m	$\sigma_{(DTM)} = \pm 2.0$ m
Carta alla scala 1:5.000:	$t_{(cl)} = 2.2$ m	$\Delta_{(cl)} = 5$ m	$\sigma_{(DTM)} = \pm 1.2$ m
Carta alla scala 1:2.000:	$t_{(cl)} = 0.9$ m	$\Delta_{(cl)} = 2$ m	$\sigma_{(DTM)} = \pm 0.5$ m
Carta alla scala 1:1.000:	$t_{(cl)} = 0.6$ m	$\Delta_{(cl)} = 1$ m	$\sigma_{(DTM)} = \pm 0.3$ m
Carta alla scala 1:500:	$t_{(cl)} = 0.4$ m	$\Delta_{(cl)} = 0.5$ m	$\sigma_{(DTM)} = \pm 0.2$ m

$\Delta_{(cl)}$ = equidistanza delle curve di livello

La precisione planimetrica (1σ) corrispondente varia secondo la tabella sopra riportata tra ± 0.1 e ± 0.2 mm (con una tolleranza di 0.4mm, secondo le indicazioni della Commissione Geodetica Italiana).

L'esperienza mostra tuttavia che in un DEM la precisione sopra indicata non viene sempre conseguita. Il DTM del progetto "It 2000", le cui caratteristiche sono richiamate brevemente nel paragrafo 3.3. Derivato in buona parte dalle CTR, ha una precisione di ± 5 m ("l'accuratezza media" dichiarata è infatti di metà dell'equidistanza della CTR 1:10.000). Una precisione analoga, di circa 4m, è stata verificata nel DTM elaborato dalla Provincia Autonoma di Trento sulla base della CT Provinciale alla scala 1:10.000.

Può essere d'altra parte utile ricordare in questo contesto che il DTM derivato in Svizzera dalla carta 1:25.000 ha effettivamente una precisione di ± 2 m in aree rappresentate con equidistanza di 10 m, integrate da curve intermedie

(ausiliarie) nelle zone pianeggianti del settentrione (Middelland).

Considerazioni aggiuntive sarebbero poi necessarie se volessimo richiedere che le curve di livello per una CT fossero derivate, rispettando le prescrizioni di cui sopra, da un DTM esistente. In questo caso dovremmo ulteriormente ridurre i valori di precisione indicati di un 50% circa.

2.5. Requisiti di un DTM per la produzione di ortofoto.

Nel definire i requisiti di precisione del DTM occorre anche considerare quelli legati alla produzione di ortofoto. Le ortofoto sono prodotte da foto aeree per raddrizzamento differenziale. Questa operazione converte geometricamente la proiezione centrale di una foto aerea in una proiezione ortogonale, producendo una immagine fotografica con la medesima geometria di una carta topografica. La trasformazione viene effettuata per porzioni di immagine, tenendo in considerazione l'inclinazione del fotogramma e lo spostamento radiale sull'immagine dovuto alle variazioni di quota del terreno. Oggetti specifici come edifici od alberi non sono in generale presi in considerazione ed appaiono pertanto con spostamenti radiali residui rispetto alla posizione corretta.

La precisione delle ortofoto dipende dalla precisione degli elementi di orientamento dei fotogrammi e dalla precisione del DTM. Le zone lontane dal punto nadirale, che in fotogrammi verticali è prossimo al punto principale, subiscono uno spostamento radiale Δr . Esso è funzione della distanza dal punto nadirale (r' , misurata sul fotogramma, che assume valore massimo di circa 100mm), della distanza principale della camera (f , in genere 153 mm per obiettivi grandangolari e 300 mm per obiettivi con campo normale) e della precisione del DTM (ΔH)

$$\Delta r = \Delta H * (r' / f);$$

Si verifica facilmente che in queste ipotesi il massimo errore planimetrico Δr è pari a 2/3 dell'errore in quota ΔH per fotogrammi ripresi con obiettivi grandangolari (WA) e ad 1/3 di ΔH per fotogrammi ripresi con obiettivi a campo normale (NA). Per la tolleranza planimetrica si può far riferimento al valore fissato per le Carte Tecniche, pari a 0.4 mm, ricordato nel capitolo precedente. Esprimendo tale valore in termini di sqm (1σ), si ha uno spostamento radiale residuo sull'ortofoto pari a ± 0.13 mm. Questo valore tiene conto che anche altre componenti d'errore influenzano la precisione planimetrica. Lo spostamento radiale provoca infatti un errore planimetrico solo nelle zone periferiche dei fotogrammi.

Con queste considerazioni è possibile calcolare le precisioni richieste al DTM in funzione delle diverse focali attualmente in uso in fotogrammetria aerea, riassunte in Tabella 3:

Scala Ortofoto	Precisione planimetrica	Precisione richiesta al DTM	Precisione richiesta al DTM
	corrispondente a 0.13 mm	Grandangolare (WA)	Campo Normale (NA)
		f=153 mm	f=300mm
	(m)	(m)	(m)
1:25000	3.25	4.88	9.8
1:10000	1.30	1.95	3.9
1:5000	0.65	0.98	2.0
1:2000	0.26	0.39	0.8
1:1000	0.13	0.20	0.4
1:500	0.07	0.10	0.2

Tabella 3 - Precisione richiesta al DTM per la produzione di ortofoto

Possiamo allora integrare e modificare i valori di precisione in precedenza elaborati coi seguenti:

Scala della carta	σ (DTM)	σ (orto WA)	σ (orto NA)
1:10.000:	± 2.0 m	± 2.0 m	± 4.0 m
1:5.000:	± 1.2 m	± 1.0 m	± 2.0 m
1:2.000:	± 0.5 m	± 0.4 m	± 0.8 m
1:1.000:	± 0.3 m	± 0.2 m	± 0.4 m
1:500:	± 0.2 m	± 0.1 m	± 0.2 m

E' tecnicamente possibile usare nelle riprese focali più lunghe ($f=600\text{mm}$) o ridurre ulteriormente la parte centrale del fotogramma impiegata per l'ortofoto, così da rientrare nei limiti pur impiegando DTM di minor precisione. Questa scelta è tuttavia piuttosto ridotta per le ortofoto a piccola scala (ad es. 1:10.000), per i vincoli pratici imposti dall'altezza di volo. In genere le foto aeree possono essere ingrandite da 4 a 7 volte (ed in casi particolari anche di più) per produrre ortofoto. Questo significa che i fotogrammi originali avranno scale tra 1:40.000 ed 1:1:70.000 per ortofoto 1:10.000. La massima quota di volo per un aereo da ripresa fotogrammetrica è 12000 m; solo speciali aerei da ricognizione come l'U2 possono arrivare a 20000 m. Pertanto l'impiego di focali da 600 mm con scale immagine inferiori ad 1:25.000 diventa impraticabile da aereo ed è riservato ai satelliti. Infatti il satellite IKONOS fornisce immagini con 1m di risoluzione in pancromatico e 4 m a colori; satelliti con

prestazioni anche maggiori sono in allestimento e verranno lanciati nel corso del prossimo anno. Diverse esperienze hanno mostrato che le immagini IKONOS ad alta risoluzione sono adatte a produrre ortofoto a colori 1:10.000 e, con una piccola perdita di qualità, anche 1:5.000. Il satellite vola a 630 km di altezza e copre a terra una striscia di 11 km di larghezza. Questo significa che un errore di quota nel DTM induce un errore planimetrico di 1/100 per immagini verticali (non per tutte le riprese IKONOS, che possono anche essere assai oblique). Di conseguenza un DTM con precisione di $\pm 50\text{m}$ sarebbe sufficiente per ortofoto 1:5.000. Se si impiegassero immagini ad alta risoluzione riprese da satellite, il DTM prodotto dall'I.G.M. sarebbe pertanto del tutto adeguato per ortofoto 1:5.000 e 1:10.000. Per quanto tecnicamente possibile ottenere ortofoto di precisione con DTM di precisione piuttosto bassa, non è del tutto evidente che questo approccio sia il più economico; attualmente le immagini IKONOS senza correzione differenziale sono vendute a circa 20US\$ (circa 30.000Lit) per km^2 con considerevoli vincoli alla diffusione. Vi è inoltre una certa difficoltà da parte del gestore a fornire immagini solo nadirali.

3. Rassegna dei DTM attualmente disponibili in Italia.

Nel seguente capitolo verranno esaminati stato e precisione dei DTM attualmente esistenti in Italia; in particolare si prenderanno in considerazione quelli realizzati dai seguenti Soggetti: I.G.M., Regioni e Province Autonome, AIMA e Compagnia Generale Ripresearee.

3.1. Il DTM prodotto dall'Istituto Geografico Militare.

L'I.G.M. ha incaricato nel 1986 una ditta privata di digitalizzare l'orografia della cartografia ufficiale alle scale 1:25000, 1:50.000 ed 1:100.000. Da questi dati numerici l'I.G.M. ha ricavato per interpolazione il DTM. Il progetto è terminato nel 1990. L'I.G.M. sta attualmente aggiornando il DTM, migliorandone la precisione, di pari passo con la produzione della nuova cartografia numerica vettoriale alla scala 1:25000 (vedi Tabella 4).

Il DTM prodotto è caratterizzato da precisioni diverse, legate alla scala della carta di origine ed agli standard impiegati all'epoca di redazione:

- Nelle aree derivate dalle tavolette 1:25.000 (Italia centrale, in **bianco**) la precisione stimata è di $\pm 7-12\text{m}$ (circa il 60% del paese), nelle zone con foreste e copertura arborea la precisione (scarto quadratico medio) è circa $\frac{1}{4}$ dell'altezza degli alberi, ovvero in linea col valore sopra riportato. La precisione varia comunque considerevolmente, in funzione della zona e del tipo di tavoletta

(quelle più vecchie hanno qualità inferiore). Le informazioni altimetriche sono fornite da curve di livello, punti quotati e linee di costa dei laghi principali e dei mari; non sono disponibili altre breaklines.

Equidistanza: 25m (curve ausiliarie: 5m)

Le aree rappresentate in **verde** (5%, Calabria) hanno una precisione lievemente maggiore di quelle in bianco;

- Una precisione più elevata, di circa $\pm 5\text{m}$ (stimata) è stata ottenuta laddove le curve di livello provengono da restituzione fotogrammetrica numerica (aree in **giallo**, circa il 10% del territorio).

Equidistanza: 25m (curve ausiliarie: 5m)

- In aree basate sulla vecchia carta 1:50.000 (in **grigio** - Sicilia) la precisione stimata è di $\pm 10\text{-}20\text{m}$ (circa il 10% del territorio).

Equidistanza: 25m (curve ausiliarie: non impiegate)

- In aree basate sulla carta 1:100.000 (Nord-Ovest ed Alpi - **anch'esse in grigio**) la precisione stimata è di $\pm 50\text{m}$ (circa il 15% del territorio). La precisione dipende molto dalla pendenza e dalla quota.

Equidistanza: 50m ;

(Fonte: Comunicazione del Ten. Col. Afeltra, I.G.M. Febbraio 2000, integrata nel Marzo 2001, per le zone in giallo)

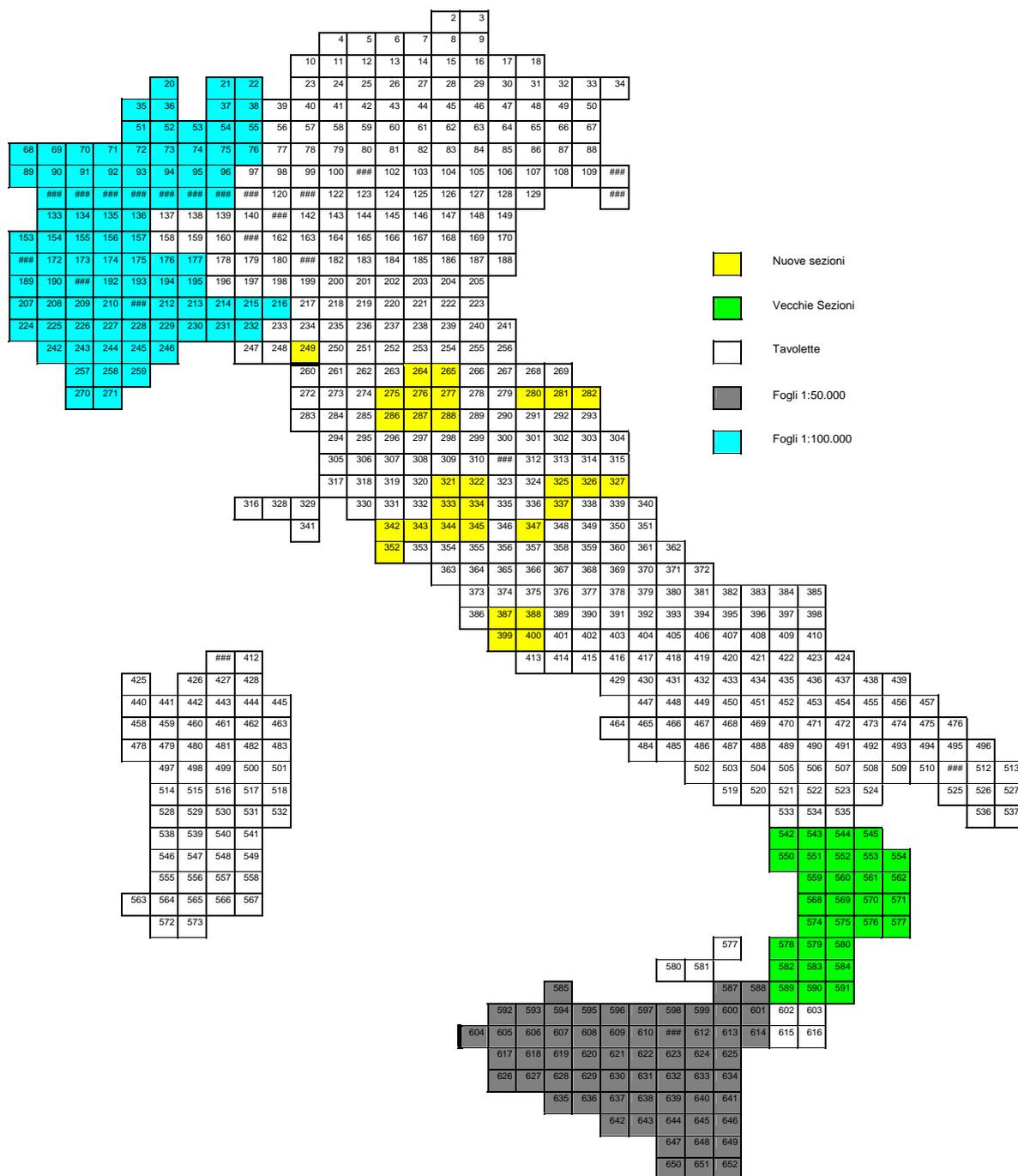


Tabella 4 : Livelli di precisione del DTM prodotto dall'I.G.M.:

- giallo: nuove sezioni 1:25000, restituite numericamente, precisione in quota (stimata) $\pm 5m$;
- bianco: tavolette 1:25000, non tutte restituite fotogrammetricamente; precisione $\pm 7-12 m$ (molto variabile da foglio a foglio e da zona a zona);
- verde: (Calabria): tavolette 1:25000 con precisione simile a quelle della zona in bianco;
- grigio: (Sicilia): vecchi fogli 1:50.000 con precisione $\pm 10-20m$;
- blu : (Nord-Ovest): fogli 1:100.000, bassa precisione: $\pm 50m$ (fortemente dipendente dalla quota)

Il DTM nazionale dell'I.G.M. rappresenta un valido insieme di dati di base, disponibile sull'intero paese. Esso possiede caratteristiche qualitative migliori di altri DTM derivati da satellite e dovrebbe essere considerato come il livello base fra i DTM nazionali. Nel seguito si indicherà come "Livello 0" il livello di precisione di questo DTM.

3.2. Dati di altezza provenienti dalle Carte Tecniche Regionali.

Le CTR, prodotte sulla base delle prescrizioni citate (o anche di altre specifiche semplificate), ed i DTM derivati dai loro dati altimetrici rappresentano il livello di precisione immediatamente superiore. L'elenco seguente e la Tabella 5, compilata dal Dr. Cumer nel Novembre 2000, vanno intesi come un tentativo di fornire un quadro dello stato di queste basi di dati; una verifica tecnica più puntuale dello stato in ciascuna Regione è in corso per iniziativa del CTC:

1. Lombardia: Base dati geografica alla scala 1:10.000; classe "Altimetria", layers "Curve di livello" e "Punti quotati", derivati dalla Carta Tecnica Regionale, a copertura di tutto il territorio regionale.

Per alcune porzioni di territorio esiste un DTM a maglia 20X20, che per le zone montane sarà completato entro il giugno 2001.

2. Veneto: i dati disponibili per un DTM sono derivati dalla Cartografia Tecnica Regionale: il relativo DTM sarebbe quindi composto da numerose parti differenti fra loro, in funzione dell'epoca e della metodologia di realizzazione della CTR.

3. Friuli-Venezia Giulia: un DTM di alta precisione, che copre circa l'80% della superficie regionale, è derivato dalla CTR alla scala 1:5.000 con precisioni da 1:2.000. E' già appaltato il completamento e sono già disponibili prodotti di minore qualità su tutto il territorio.

4. Emilia Romagna: la situazione è analoga a quella del Veneto.

5. Liguria: esiste un DTM impiegato per la produzione di ortofoto (con ortofotoproiettori); per la fascia costiera si può impiegare lo strato Altimetria della cartografia 1:5.000.

6. Toscana: situazione analoga a Veneto e Emilia-Romagna, salvo notevole copertura del territorio con cartografie alla scala 1:2.000, prodotta in sinergia fra Regione e Comuni.

8. Marche: curve di livello vettoriali e break-lines derivate da DTM impiegato per la produzione di ortofoto con ortofotoproiettori.

7. Umbria: disponibili lo strato delle curve di livello e dei punti quotati da cartografia 1:10.000 e, sulle aree piu' importanti, da cartografia 1:5.000
9. Abruzzo: esiste un DTM derivato da cartografia numerica che interessa circa 260.00 ha; per la restante parte si hanno i profili altimetrici impiegati per la produzione di ortofoto con ortofotoproiettori .
10. Sardegna: dati vettoriali derivati da cartografia tecnica 1:10.000 su tutto il territorio, salvo limitata porzione dove esistono dati raster.
11. Sicilia: esiste DTM utilizzato per la produzione di ortofotocarta alla scala 1:25.000 del 1994; origine e precisione dei dati non sono specificati.
12. Puglia: l'Amministrazione Provinciale di Lecce ha realizzato Cartografia numerica alla scala 1:5.000. E' da verificarne la disponibilita', attraverso l'Ufficio Cartografico della Regione.
13. Provincia autonoma di Trento: DTM da CT 1:10.000 disponibile su tutta la provincia (sqm: $\pm 4m$).

Si può concludere che una gran parte d'Italia è già coperta da DTM con una precisione di $\pm 5m$ o superiore.

REGIONI	CARTA NUMERICA		ALTRE	DTM - STRATO ALTIM. DA CART. ANALOGICA	DTM	ITALIA 2000
	1:5.000 % SUP.	1:10.000 % SUP.				
ABRUZZO	40 (60 2002)		ortof.mecc. 70% 1:10.000		da cartogr. in produz.	no
BASILICATA	100 (2002)		ortof.mecc. 70%		iDTM	si
CALABRIA	100 (2002)				iDTM	si
CAMPANIA	in produzione				iDTM	si
EMILIA-ROM.				100% entro 2001		55%
FVG	100 (2002)		CTR numer. 1:25.000		da cartogr.num.	si
LAZIO			raster CTR 1:10.000			prov.RM
LIGURIA	60		ortof. mecc. 1:10.000		da CTR5000 e ortof.	si
LOMBARDIA				100% entro 2001	20x20 -2001	si (2001)
MARCHE		100	ortof. mecc. 1:10.000		da ortofoto mecc.	no
MOLISE	100				da cartogr. Num. numerica	no
PIEMONTE	prov.TO	100			100% maglia 50m	prov. TO
PUGLIA	prov. LE					no
SARDEGNA		90	ortof. 1:10.000		deriv. da CTR	si(?)
SICILIA		50 (2002)	ortof. 1:25.000	In realizz. su 70%	per ortof. 1:25.000	in acquis.
TOSCANA		100(06/01)	15% 1:2.000 numer.		Si (vedi CTR)	no
UMBRIA	parte	100 (2002)			da derivare	si
VAL D'AOSTA	100				maglia 10-25-50-100m	si
VENETO		80			da CTR	si
BOLZANO			ortof. mecc. 1:10.000		da ortofoto	Si
TRENTO		50 (2002)		strato altim. da CTR	40m-10m	Si

Tabella 5: Quadro della CN e dei DTM nelle Regioni (a cura del Dr. Cumer).

3.3. Il DTM della Compagnia Generale Ripresearee

La Compagnia Generale Ripresearee (CGR) produce da diversi anni per conto dell'AIMA ortofoto a scala 1:10.000, destinate inizialmente ad un inventario degli ulivi. Per la produzione del DTM necessario a tale attività CGR ha utilizzato i dati, numerici e non, derivati dalle CTR alla scala 1:10.000 e 1:5.000, integrandoli dove mancanti o carenti con misure effettuate dalle riprese del volo ITALIA 94 (scala media dei fotogrammi 1:75.000). Successivamente, deciso l'avvio del Programma "IT 2000", la CGR ha provveduto a migliorare la qualità del DTM usato per le ortofoto AIMA. La "accuratezza media" dichiarata per questo DTM è pari a metà dell'equidistanza delle CTR10, ovvero $\pm 5m$ (cfr. Programma "it 2000" L'ortofoto digitale a colori del territorio italiano - Caratteristiche Tecniche (Allegato 1)). Sempre secondo il medesimo documento, la precisione in quota ottenuta per via fotogrammetrica (dalla scala immagine 1:75.000) è anch'essa $\pm 5m$ in terreno aperto, assai inferiore in aree con densa vegetazione.

Esiste pertanto un DTM di tutto il paese con una precisione (sqm) di $\pm 5m$. Nel seguito si indicherà come "Livello 1" lo standard di precisione di questo DTM.

4. Requisiti di precisione per i DTM.

4.1. Requisiti di precisione di un DTM per la produzione di ortofoto.

Nel capitolo 2 si è discusso sugli aspetti da considerare nel derivare i requisiti di precisione di un DTM a livello nazionale. La finalità principale di questo DTM è la produzione di ortofoto alla scala 1:10.000 (e, laddove possibile ed opportuno, alla scala 1:5.000); esso dovrebbe essere adatto a studi di carattere ambientale e soddisfare le esigenze della pianificazione territoriale.

Limitandoci alla sola produzione di ortofoto 1:10.000 potremmo accettare una precisione in quota del DTM di $\pm 2\text{m}$, usando obiettivi grandangolari fino alla scala immagine 1:70000, ovvero $\pm 5\text{m}$ usando obiettivi a campo normale con scale immagine fino a 1:40000. Scale immagine inferiori con lunghezze focali di 300 mm sono infatti, come già ricordato, difficili da ottenere per i limiti alla quota di volo degli aerei. Un'alternativa è l'impiego di immagini ad alta risoluzione da satellite, che richiedono una precisione di soli $\pm 50\text{m}$ per ortofoto 1:5.000, almeno per il rispetto della precisione geometrica (planimetrica). Per ortofoto 1:5.000 si richiede un DTM con precisione di $\pm 1\text{m}$ con obiettivo grandangolare e di $\pm 2\text{m}$ con obiettivo a campo normale.

La tabella 6 riassume le precisioni richieste al DTM per la produzione di ortofoto. La precisione del DTM è suddivisa in 6 livelli; da un livello all'altro la precisione aumenta di circa un fattore 2.

	Precisione in quota (terreno aperto)	Produzione di ortofoto alla scala		Rispetta la precisione in quota delle curve di livello della CT	Applicazioni principali
		WA, f=153	NA, f=300		
"Level 0"	$\pm 10.0\text{m}$				Ortofoto 1:10.000, 1:5.000 da immagini satellitari
"Level 1"	$\pm 5.0\text{m}$	1:25.000	1:10.000*		Ortofoto 1:10.000*
"Level 2"	$\pm 2.0\text{m}$	1:10.000	1:5.000		Ortofoto 1:5.000*, 1:10.000
"Level 3"	$\pm 1.0\text{m}$	1:5.000	1:2.000*	1:10.000	Ortofoto 1:2.000*, 1:5.000
"Level 4"	$\pm 0.30\text{m}$	1:1000*	1:500*	1:2000	Ortofoto 1:1.000*, 1:500*
"Level 5"	$\pm 0.15\text{m}$	1:500*		1:1000, 1:500*	

*** indica che le specifiche sono soddisfatte con riserva**

Tabella 6: Precisione richiesta al DTM per la produzione di ortofoto

4.2. Requisiti di precisione di un DTM per la pianificazione e gli studi ambientali.

Gli standard più elevati per i DTM sono necessari nello studio di zone inondabili; molto severi sono anche i limiti nelle costruzioni stradali, nelle opere che implicano movimenti terra e quelli in alcuni settori della pianificazione territoriale. Come detto al punto 2.3, l'agenzia statunitense FEMA richiede una precisione del DTM di ± 15 cm. L'Olanda, paese a forte rischio di inondazioni, ha prodotto un DTM con una precisione di circa ± 30 cm. Questo valore è pressapoco equivalente alla precisione delle curve di livello di una Carta Tecnica 1:1000 (cfr 2.4). Pertanto aree pianeggianti ad elevato rischio di inondazione dovrebbero essere coperte da un DTM di questa precisione. Si raccomanda un valore di ± 15 cm per aree pianeggianti con pendenze $< 1\%$ (valore di prima indicazione, da valutare ulteriormente) e di ± 30 cm per tutte le altre aree a rischio di inondazione. Un analogo livello di precisione è raccomandabile per aree urbane e per zone con intense attività costruttive.

In linea di principio sarebbe auspicabile un livello di precisione di ± 30 cm per la maggior parte delle aree ad intenso sviluppo del paese; tale obiettivo non è tuttavia compatibile coi fondi attualmente a disposizione. Pertanto, per aree senza rischi particolari di inondazioni è accettabile un minor livello di precisione, equivalente alle specifiche delle CTR 1:5.000 o 1:10.000. La precisione sarebbe in tal caso tra ± 1 m e ± 2 m. Precisioni inferiori sono in linea di principio giustificabili solo come prodotti intermedi, che siano stati derivati da altre basi di dati o altra cartografia, oppure per aree montuose di modesto valore economico. Tenendo conto degli standard piuttosto elevati dei dati già esistenti, sembra logico concentrarsi sui livelli di precisione maggiori.

Nelle tabelle 7 ed 8 si fornisce un quadro delle specifiche di precisione proposte. Sono inoltre incluse indicazioni sul passo di griglia, il valore suggerito per il massimo errore sistematico e le raccomandazioni circa la precisione planimetrica dei dati del DTM, inclusi i punti quotati e le breaklines. Sono adottati i medesimi livelli di precisione già introdotti in Tabella 6:

	Precisione in quota Terreno Aperto	Precisione in quota vegetazione fitta	Distanza di griglia	Errore Sistematico Terreno Aperto	Precisione planimetrica degli elementi del DTM	Break lines
"Level 0"	±10.0m	±15.0m	20m	<5m	±5.0m	Linee di costa
"Level 1"	±5.0m	±5.0m	20m	<2.5m	±2.0m	Linee di costa, viadotti salti del terreno > 4.0m,
"Level 2"	±2.0m	±1/4 H veg.	20m	<1.0	±1.0m	strade, ponti, coste.. salti del terreno > 2.0m,
"Level 3"	±1.0m	±1/4 H veg.	10m	<0.5m	±0.5m	dighe, strade, ponti, coste.. salti del terreno > 0.6m,
"Level 4"	±0.30m	±0.60m	5m	<0.15m	±0.3m	dighe, strade, ponti, coste. salti del terreno > 0.30m,
"Level 5"	±0.15m	±0.15m	5m	<0.08m	±0.3m	dighe, strade, ponti, coste..

Tabella 7: Quadro dei livelli di precisione e relative specifiche tecniche

	Precisione in quota (terreno aperto)	Settore di applicazione (a titolo di esempio)	Fonte dei dati
"Level 0"	±10.0m	In mancanza di altri dati	I.G.M., zone di bassa prec.
"Level 1"	±5.0m	Zone d'alta montagna	Regioni, CGR, I.G.M. dati recenti
"Level 2"	±2.0m	Ortofoto 1:10.000	CT 1:10.000/1:5.000, fotogr, laser .
"Level 3"	±1.0m	Ortofoto 1:5.000, agricoltura aree urbane, zone indondabili	CT 1:2000, fotogr., altim. laser
"Level 4"	±0.30m	con pend.> 1%	CT 1:1000, altimetria laser
"Level 5"	±0.15m	aree indondabili con pend.< 1%	CT 1:500, altimetria laser

Tabella 8: Quadro dei livelli di precisione, principali applicazioni e sorgenti di dati

4.3. Descrizione dei Livelli di Precisione.

4.3.1. Specifiche per il livello 0.

“Livello 0”: Precisione in quota $\pm 10\text{m}$, passo di griglia 20m , errore sistematico $< 5\text{m}$,
precisione planimetrica di punti quotati ed elementi lineari: $\pm 5\text{m}$ (0.1 mm alla scala 1:50.000).

Breaklines per i seguenti oggetti: , linee di costa dei laghi, corsi d’acqua importanti, mari. Le break lines devono seguire il terreno con la precisione sopra definita.

Applicazioni principali: ortofoto alla scala 1:10.000 e 1:5.000 da immagini ad alta risoluzione da satellite (IKONOS) con ripresa nadirale.

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

Sorgente dei dati: DTM a bassa precisione dell’ I.G.M.

4.3.2. Specifiche per il livello 1.

“ Livello 1”: Precisione in quota $\pm 5\text{m}$, passo di griglia 20m , errore sistematico $< 2.5\text{m}$,
precisione planimetrica di punti quotati ed elementi lineari: $\pm 2.5\text{m}$ (0.1 mm alla scala 1:25.000).

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

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

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

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

4.3.2. Specifiche per il livello 2.

“ Livello 2”: Precisione in quota: $\pm 2\text{m}$, passo di griglia 20m, err. sistematico $< 1\text{m}$,
precisione planimetrica di punti quotati ed elementi lineari: $\pm 1\text{m}$ (0.1 mm alla scala 1:10.000).

In aree con densa vegetazione (copertura arborea $> 70\%$) è ammessa una precisione in quota pari ad $\frac{1}{4}$ dell'altezza degli alberi.

Break lines o punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno maggiori di 4m entro una maglia del grigliato.

Break lines sempre necessarie per i seguenti oggetti: dighe, viadotti, , linee di costa di laghi, fiumi, mari ed impluvi; le breaklines devono seguire il terreno con la precisione sopra specificata.

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

Delimitazione della zona rappresentata.

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

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

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

4.3.4. Specifiche per il livello 3.

“Livello 3”: Precisione in quota $\pm 1.0\text{m}$, passo di griglia 10m, errore sistematico $< 0.5\text{m}$,
precisione planimetrica di punti quotati ed elementi lineari: $\pm 0.5\text{m}$ (0.1 mm in 1:5.000).

In aree con densa vegetazione (copertura arborea $> 70\%$) è ammessa una precisione in quota pari ad $\frac{1}{4}$ dell'altezza media degli alberi.

Break lines o punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno

maggiori di 2m entro una maglia del grigliato.

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

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

Delimitazione della zona rappresentata.

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

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

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

4.3.5. Specifiche per il livello 4.

“Livello 4”: Precisione in quota $\pm 0.3\text{m}$, passo di griglia 5m, errore sistematico $< 0.15\text{m}$, precisione planimetrica di punti quotati ed elementi lineari: $\pm 0.3\text{m}$ (0.3 mm in 1:1000, - una precisione superiore è difficile da ottenersi con laser a scansione, senza accorgimenti speciali).

In aree con densa vegetazione (copertura arborea $> 70\%$) è ammessa una precisione in quota pari a $\pm 0.6\text{m}$.

Break lines o punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno maggiori di 0.6m entro una maglia del grigliato.

Break lines 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 breaklines devono seguire il terreno con la precisione sopra specificata.

Delimitazione delle aree non rappresentabili (“zone morte”): edifici, specchi d’acqua, zone di minor precisione per densa vegetazione. Le linee di

delimitazione devono indicare la quota del terreno, altrimenti (ad es. se appartenenti ad un tetto) devono avere quota convenzionale; gli specchi d'acqua devono seguire il terreno.

Delimitazione della zona rappresentata.

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

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

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

4.3.6. Specifiche per il livello 5.

“Livello 5”: Precisione in quota $\pm 0.15\text{m}$, passo di griglia 5m, errore sistematico $< 0.08\text{m}$, precisione planimetrica di punti quotati ed elementi lineari: $\pm 0.3\text{m}$ (0.3 mm in 1:1000, - una precisione superiore è difficile da ottenersi con laser a scansione, senza accorgimenti speciali).

In aree con densa vegetazione (copertura arborea $> 70\%$) è ammessa una precisione in quota ridotta, pari a $\pm 0.6\text{m}$.

Break lines o punti quotati per oggetti che causano irregolarità del terreno maggiori di 0.3m entro una maglia del grigliato.

Break lines 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 breaklines devono seguire il terreno con la precisione sopra specificata.

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

Delimitazione della zona rappresentata.

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

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

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

5. Tecnologie e metodi di produzione.

Nel seguente paragrafo vengono sviluppate le specifiche relative alle diverse tecniche di acquisizione dati per la produzione di DTM. Esse vanno intese come raccomandazioni ma possono altresì essere parte delle prescrizioni di un capitolato. Si riferiscono all'uso di carte esistenti restituite direttamente in forma numerica (o digitalizzate se necessario), all'acquisizione dati da fotogrammetria e da laser a scansione. L'obiettivo di produrre in un breve lasso di tempo un DTM a livello nazionale richiede una serie di compromessi e lo sfruttamento dei dati esistenti. Nella raccolta dei dati per produrre il DTM potrebbe quindi essere adottato il seguente ordine di priorità :

1. dati provenienti da DTM di alta precisione realizzati in progetti diversi a livello regionale (o provinciale o di Autorità di Bacino) rilevati con laser, metodi topografici o fotogrammetrici di alta precisione;
2. modelli digitali del terreno esistenti, che soddisfino le precisioni richieste;
3. curve di livello in formato numerico ed altri elementi da cartografia 1:5.000 o 1:10.000;
4. acquisizione di curve di livello ed altri elementi mediante digitalizzazione di CTR 1:5.000 o 1:10.000, purchè le precisioni richieste siano rispettate;
5. nuovi rilievi con laser a scansione, fotogrammetria o misure terrestri.

E' importante che gli enti responsabili a livello regionale o provinciale fissino delle priorità e definiscano degli standard sia sul breve che sul lungo termine in base alle necessità specifiche ed ai fondi disponibili. A lungo termine è opportuno tendere verso DTM almeno di livello 3 e, per le aree maggiormente urbanizzate, di livello 4 o 5. Tuttavia nel breve periodo sarà necessario ammettere, in diverse zone, delle prescrizioni meno rigide per soddisfare in breve tempo l'esigenza di un DTM che permetta la produzione di ortofoto anche di "minor precisione".

5.1. Il controllo di qualità.

Ci sono due modalità fondamentali per un corretto controllo di qualità:

1. Controllo di qualità di ciascuna fase in cui si articola la produzione dei dati topografici;
2. Determinazione di una rete di punti di controllo caratterizzata da precisione più elevata rispetto ai dati da verificare e impiego di punti geodetici esistenti (punti o c.s. fissi). Questa rete può essere realizzata con misure GPS eventualmente anche rilevando in modalità cinematica da un'autovettura in moto, se si prendono i necessari accorgimenti, preferibilmente muovendosi lungo le strade adiacenti a dei profili Nord-Sud ed Est-Ovest. Si raccomanda di individuare almeno 3 profili che attraversino l'intera regione, presi con valori chilometrici interi della griglia nazionale. Questa scelta casuale dei profili dà luogo ad una scelta obiettiva degli elementi di controllo, che possono comunque essere raffittiti successivamente qualora se ne ravvisi la necessità. Si possono impiegare anche altre tecniche, ma è importante applicare metodi che diano una visione d'insieme della precisione dei dati, mettendo anche in luce l'eventuale presenza di una componente sistematica.

5.2. L'inventario dei dati già disponibili.

Si raccomanda di realizzare prioritariamente un inventario dei dati topografici esistenti, includendo anche quelli dell'I.G.M. e documentando origine, metodi di produzione e livello di qualità dichiarato. Le aree con dati di precisione omogenea potrebbero essere rappresentate su una carta numerica (ad una scala 1:200.000). Questo inventario, con un dettagliato resoconto e le raccomandazioni per la produzione ed il controllo di qualità del DTM, verrà trasmesso al CTC che, con l'eventuale supporto tecnico del Gruppo di Lavoro, potrà deliberare in merito alle procedure da adottarsi in ogni area per la realizzazione del DTM "di base" per le ortofoto 1:10.000 e le applicazioni ambientali.

In una seconda fase, gli standard di qualità verranno controllati misurando con GPS (o altri metodi adeguati) una serie di profili in direzione E-O e N-S (prescrizioni dettagliate verranno fornite dal CTC). Questi profili possono essere misurati da un veicolo che percorra strade prossime al tracciato nominale. I punti lungo il profilo devono essere misurati ad una distanza media pari ad $1/3$ della distanza tra i nodi della griglia del DTM. Inoltre, da 30 a 100 punti dovranno essere misurati su terreno accidentato, ad esempio in vallate fluviali con densa vegetazione. I punti GPS verranno confrontati con i dati altimetrici da impiegare per la generazione del DTM (siano essi in forma grafica o numerica). Nel caso in cui il DTM sia già disponibile, le quote GPS verranno confrontate con quelle interpolate dal modello nelle corrispondenti posizioni planimetriche. Nel caso in cui esistano solo le curve di

livello in forma numerica o grafica, verranno calcolate le quote del profilo GPS nei punti in cui esso interseca le curve di livello. Nelle zone pianeggianti, prive di curve di livello, si confronteranno le quote formando un TIN coi punti quotati a cavallo del profilo e interpolando la quota in corrispondenza del punto GPS.

Il controllo di qualità dovrà anche verificare la correttezza della georeferenziazione planimetrica.

I risultati di queste valutazioni verranno consegnate al CTC con una dettagliata descrizione della procedura raccomandata per la produzione del DTM, specifica per ciascuna delle zone a precisione omogenea in precedenza individuate, assieme ad indicazioni per il controllo di qualità (comprese le misure GPS in formato numerico).

5.3. Digitalizzazione di cartografia al tratto preesistente.

Lo scopo principale è la produzione di un DTM in formato raster, comprendente le breaklines (secondo quanto specificato nel Cap. 4), con la massima precisione consentita dai dati esistenti: pertanto è molto importante una chiara documentazione del livello di precisione atteso. Il controllo di qualità, già descritto nel paragrafo precedente, deve interessare tutte le fasi del lavoro e includere un controllo indipendente sul campo, il cui onere non deve tuttavia superare il 30% di quello richiesto per la produzione del DTM.

I dati altimetrici vettoriali ed il DTM, da essi generato, devono essere espressi nel sistema di riferimento di cui al punto 1.3 e memorizzati secondo il formato di cui al punto 1.4.

5.3.1. Digitalizzazione delle curve di livello.

E' importante che le curve di livello e gli altri elementi della carta siano digitalizzati da un originale o da copia su supporto indeformabile. Il reticolato chilometrico deve essere anch'esso acquisito al fine di permettere la georeferenziazione dei dati e la stima delle eventuali deformazioni. La precisione di digitalizzazione deve essere di 0.1 mm; eventuali deformazioni superiori a tali valori devono essere corrette con appropriate trasformazioni geometriche dei dati. E' preferibile che le curve di livello siano acquisite con scansione del supporto; la vettorizzazione può essere effettuata sia con metodi ad inseguimento automatici sia manuali. Ad ogni linea, così ottenuta, deve essere poi associata la quota della corrispondente curva di livello.

Il controllo del processo di digitalizzazione viene effettuato confrontando le curve di livello numerizzate con le originarie. Possono essere tollerate differenze massime di 0.3 mm grafici tra le curve originali e quelle digitalizzate.

5.3.2. Digitalizzazione dei punti quotati.

Analogamente alle curve di livello verranno digitalizzati i punti quotati, con le stesse avvertenze per ciò che riguarda la georeferenziazione e la compensazione delle deformazioni dei fogli. Vengono memorizzati solo i punti che si riferiscono a particolari del terreno vero e proprio (ad es. i punti quotati su manufatti - rilevati, argini, ponti, fabbricati, ecc. - devono essere tralasciati, se questi oggetti non possono essere adeguatamente modellati nel DTM).

5.3.3. Digitalizzazione degli elementi lineari.

Devono essere acquisite dalla carta anche le breaklines e le perimetrazioni delle aree non rappresentate nel DTM ("zone morte" o "dead areas"). Tutti i vertici di tali linee devono essere corredati della quota, inserita manualmente dall'operatore. Particolare attenzione dovrà essere prestata nell'assegnare la quota di ponti e viadotti.

5.3.4. Generazione del grigliato regolare del DTM.

Come già indicato, i dati del DTM sono composti da una griglia regolare e da vari tipi di linee. La griglia, con il passo specificato nel par. 4.3 per i differenti livelli, deve essere prodotta con adeguati programmi di elaborazione di DTM. E' importante che il programma possa trattare in modo speciale i punti provenienti da curve di livello, per evitare interpolazioni tra vertici della medesima curva. La scelta del programma per il DTM è per il resto libera, tenendo presente che a questo scopo sono necessari programmi piuttosto raffinati.

5.3.4. Controllo di qualità del processo di digitalizzazione.

Per assicurare un controllo complessivo di qualità del processo di digitalizzazione si raccomanda di rigenerare le curve di livello a partire dal DTM e di confrontarle con le originali. Differenze tra due curve di livello superiori a 0.5 mm in terreno con pendenza superiore al 5% devono essere evidenziate ed analizzate (per es. etichettando con colori diversi in ragione della possibile causa di discordanza - un punto quotato, l'influenza di una breakline, ecc...-). Errori evidenti di digitalizzazione devono essere corretti.

5.4. Acquisizione dati per i DTM per via fotogrammetrica

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) hanno costi rilevanti.

5.4.1. Generalità sull'impiego della fotogrammetria

I metodi fotogrammetrici offrono una grande varietà di opzioni per la derivazione di un DTM: 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 il DTM. Resta comunque inteso che questi procedimenti automatizzati richiedono un accurato controllo di qualità.

La precisione della determinazione fotogrammetrica del DTM in terreno aperto è pari a circa 0.2‰-0.3‰ della quota relativa di volo. La fotogrammetria è comunque alquanto condizionata dalla copertura vegetale e nelle aree boschive la precisione è notevolmente inferiore. Un ulteriore incremento nell'automazione del processo dovrebbe aversi con camere digitali (utilizzate ad es. a livello di produzione dalla ditta ISTAR - Francia); una camera lineare di elevata qualità è attualmente sviluppata dalla LH Systems.

Le procedure fotogrammetriche sono usate principalmente per i Livelli di precisione 0÷3, mentre i Livelli 4 e 5 dovrebbero essere riservati all'uso degli altimetri Laser.

5.4.2. Fasi di lavoro nella produzione del DTM per via fotogrammetrica

Il procedimento standard per la determinazione del DTM per via fotogrammetrica comprende le seguenti fasi:

1. pianificazione delle procedure operative;
2. pianificazione del volo e della distribuzione dei punti di appoggio ;
3. volo di ripresa;
4. controllo di qualità dei fotogrammi;
5. determinazione dei punti di appoggio;
6. triangolazione aerea, preferibilmente mediante metodi automatici, che richiedono la scansione dei fotogrammi;
7. compensazione della triangolazione aerea e controllo di qualità

8. determinazione del DTM per correlazione automatica di immagini;
9. editing manuale dei risultati della correlazione, completamento in campagna e controllo di qualità;
10. trasformazione dei dati del DTM nel formato finale.

5.4.3. 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 il lavoro non viene sempre eseguito da un'unica ditta ed è necessario coordinare i compiti dell'appaltatore principale e dei subappaltatori. **E' 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 ed 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 triangolazione aerea (triangolazione aerea automatica con scansione dei fotogrammi o triangolazione aerea su restitutore analitico) e per l'acquisizione dei dati del DTM (procedure automatiche basate correlazione di immagini o restituzione fotogrammetrica su restitutore analitico. I restitutori analogici non dovrebbero essere più utilizzati, a causa della minor precisione).

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

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

tempistica e dei documenti messi a disposizione del committente per il controllo di qualità ;

- dati riassuntivi sui parametri del volo di ripresa ed 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.

5.4.4. Piano di volo e distribuzione dei punti di appoggio

Fattori chiave per la determinazione del DTM 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.

L'altezza relativa di volo h per le riprese aeree (e la scala fotogramma) dipende dalla precisione richiesta per il DTM e non dovrebbe superare 2000-5000 volte lo sqm previsto ($\sigma_h=0.2-0.5\% h$). Per precisioni dell'ordine di 2-3 metri ci si dovrebbe attenere al fattore 2000, ossia per una precisione in quota di $\pm 3m$ l'altezza relativa di volo non dovrebbe superare 6000 m (scala fotogramma 1:40.000 con obiettivi grandangolari), mentre è possibile arrivare a ± 0.3 m da una quota di volo di 1500m (scala fotogramma 1:10.000). Il ricoprimento longitudinale dovrebbe essere almeno il 60%, valore da controllare attentamente nelle zone montuose. Il ricoprimento trasversale deve essere almeno del 30%, ma in tal caso è necessario inserire punti di appoggio altimetrici nelle zone di sovrapposizione di ogni strisciata o introdurre strisciate trasversali. L'altra possibilità è aumentare il ricoprimento trasversale fino al 60%: in tal caso non occorrono i punti di appoggio altimetrici di cui sopra.

La stagione di volo sarà generalmente l'estate (ammettendo quindi la presenza di foglie) per il livello di precisione 0 e di preferenza senza foglie per i livelli di precisione 1 o superiori. La pellicola può essere bianco e nero, colore o infrarosso falso-colore.

Il Committente fornirà una chiara descrizione dei parametri che definiscono la qualità di immagine desiderata (qualità ottica e geometrica dell'immagine, gamma di densità consentita per oggetti caratteristici, copertura nuvolosa ammessa e tolleranze

per i parametri di volo, ecc...). Si raccomanda di specificare che la modulazione del contrasto, in corrispondenza al valore di 20 linee per millimetro, non dia luogo ad una perdita di contrasto superiore al 20% fino ad una distanza di 100mm dal punto principale. Questo implica inoltre che il trascinamento dell'immagine non superi 30 μm . La deformazione della pellicola in corrispondenza delle marche fiduciali (in numero minimo di 8) non deve superare 50 μm (tolleranza). Detto D il logaritmo dell'opacità, valore che misura l'annerimento di una porzione di immagine, sulle strade la densità ottica dei negativi B/N dovrebbe essere $1.3D \pm 0.3D$ e nelle zone d'ombra dovrebbe essere $0.5D \pm 0.2D$.

Tenendo conto delle loro caratteristiche e delle finalità di impiego, devono essere definiti valori corrispondenti di tolleranze e densità anche per gli altri tipi di pellicola.

Gli assi delle strisciate devono essere fissati in relazione alla scala fotogramma ed ai ricoprimenti. In terreni fortemente montuosi è necessario stabilire correttamente l'abbracciamento sul terreno di ciascun fotogramma, per garantire il rispetto del minimo valore di sovrapposizione accettabile.

E' opportuno pianificare l'ubicazione dei punti di appoggio prima del volo di ripresa. Il blocco di triangolazione deve essere adeguatamente appoggiato, con almeno 2 punti di controllo completi (plano-altimetrici) in ciascuno degli spigoli del blocco; sono inoltre necessari punti di controllo completi ogni 5 modelli e ogni 5 strisciate, distribuiti sull'intera struttura del blocco. Nel caso di ricoprimento trasversale inferiore al 60%, le singole strisciate non sono sufficientemente vincolate in altezza e richiedono punti noti almeno in quota nella zona di sovrapposizione. Una catena di punti di appoggio è necessaria sul bordo del blocco e ogni 5 modelli in ciascuna strisciata. I punti di appoggio devono definire un poligono all'esterno del quale non è permessa alcuna restituzione o misurazione di punti per il DTM, a causa delle incertezze di estrapolazione. Zone più estese di metà di un modello, che non consentano di localizzare punti di legame (specchi d'acqua, nuvole, boschi fitti) devono essere trattate come zona di bordo del blocco e devono essere pertanto contornate da punti di appoggio.

In qualche caso potrebbe essere utile segnalizzare punti di appoggio già esistenti, ma in genere essi vengono determinati dopo il volo, scegliendo punti ben definiti sui fotogrammi. Per la segnalizzazione è opportuno ricordare che i punti di appoggio vanno coperti da un segnale (in materiale plastico bianco o comunque verniciato) che dovrebbe avere una forma quadrata di dimensioni di almeno 50x50 μm nelle immagini originali per le pellicole a colori o falso-colore; per le pellicole ad alta definizione B/N (Kodak Panatomic o simili) il segnale può invece essere di soli 30x30 μm .

E' opportuno ricordare che attualmente, nei voli, si stanno facendo strada l'appoggio GPS e INS in sostituzione della triangolazione aerea e dell'appoggio a terra. Sembra essere troppo presto per dare qui raccomandazioni dettagliate per l'uso di questa tecnica, ed è quindi necessario lasciare all'appaltatore la dimostrazione della precisione del sistema e le raccomandazioni per il controllo qualità. Nel caso in cui questa tecnica fornisca una precisione inferiore alla triangolazione aerea, potrebbe essere possibile compensarla mediante una quota di volo inferiore.

5.4.5. Volo di ripresa

Il volo di ripresa dovrebbe essere effettuato preferibilmente con aerei bimotori provvisti di moderne macchine da presa aeree, che soddisfacciano le suddette specifiche per la MTF e la stabilità metrica della pellicola nella camera di presa. La stagione di volo, le condizioni meteorologiche e l'altezza del sole tollerate vanno specificate dal Committente in funzione delle caratteristiche dell'area da riprendere e dell'utilizzo primario dei fotogrammi.

5.4.6. Controllo di qualità dei fotogrammi

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

- 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;
- foschia ed altri fattori che influenzano la qualità dell'immagine;
- controllo dei valori di densità ottica dei fotogrammi;
- controllo di nitidezza delle immagini;
- determinazione degli stiramenti della pellicola in alcuni fotogrammi significativi (inizio di una strisciata, inizio di un nuovo rullo di pellicola...)
- visibilità degli eventuali punti segnalizzati
- relazione tecnica generale, comprendente le specifiche fornite per l'esecuzione del volo di ripresa.

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

5.4.7. Determinazione dei punti di appoggio

E' noto che la precisione dei punti di appoggio è decisiva per la precisione

complessiva del progetto. Errori nei punti di appoggio si traducono in errori sistematici nella restituzione e dovrebbero pertanto essere ridotti il più possibile. Di conseguenza, la precisione dei punti di appoggio deve essere 5 volte superiore alla precisione di quota richiesta per il DTM e ciò vale anche per la precisione planimetrica. Pertanto, se la precisione del DTM deve essere di $\pm 2\text{m}$, la precisione dei punti di appoggio deve essere $\pm 40\text{cm}$ in planimetria e quota.

La distribuzione dei punti di appoggio è già stata trattata in 5.4.4. I punti vanno determinati con riferimento alla rete geodetica di inquadramento I.G.M., secondo quanto specificato al punto 1.3. L'appaltatore contatterà l'I.G.M. per garantire un corretto riferimento agli elementi della rete geodetica.

I punti di appoggio sono calcolati attraverso una compensazione globale con misure sovrabbondanti, che consenta il controllo della precisione dei punti e dell'affidabilità. L'affidabilità esterna non dovrebbe superare di 3 volte lo sqm dei punti di appoggio.

L'appaltatore fornirà al committente una relazione tecnica sulla determinazione dei punti di appoggio immediatamente dopo il completamento del lavoro, prima di iniziare la successiva operazione. Questa relazione comprenderà anche dettagli sulle misure e sulla compensazione della rete e le informazioni sugli elementi della rete di inquadramento forniti dall'I.G.M. La relazione dovrà inoltre consentire all'Ente appaltante di accertare se sono ancora presenti nella rete, all'interno dell'area di restituzione, deformazioni ovvero discrepanze sui punti di riferimento geodetici tali da impedire il raggiungimento della precisione prevista per i punti.

5.4.8. Triangolazione aerea

Come già detto, la triangolazione aerea può essere eseguita su restitutori analitici o digitali. E' necessario dare la massima importanza all'affidabilità della determinazione dei punti. Ciò significa che i punti di legame devono essere doppi (almeno 2 punti nelle posizioni di von Gruber - NOTA: il Gruppo di Lavoro è dell'opinione che punti di legame doppi sono davvero necessari per ottenere la necessaria ridondanza nell'orientamento del modello e la altrettanto necessaria affidabilità. Usando un solo punto di legame si possono avere deformazioni e gli errori di misura non vengono circoscritti. Invitiamo i colleghi in disaccordo a descrivere il loro approccio alla valutazione dell'affidabilità) e che deve essere garantita una connessione sufficientemente fitta fra le strisciate (con modesto ricoprimento trasversale: almeno 3 connessioni per immagine con le strisciate adiacenti; con forte sovrapposizione (45-50%): 2 catene longitudinali, disposte lungo gli assi delle strisciate, con 3 legami alle strisciate adiacenti). Il rispetto di queste condizioni deve essere dimostrato sia per la triangolazione manuale su restitutori analitici sia per la triangolazione aerea automatica su restitutori digitali. Qualsiasi

lacuna nelle connessioni deve essere corretta mediante ri-misurazione dell'immagine o mediante punti di appoggio supplementari.

5.4.9. Scansione dei fotogrammi

Se il ciclo produttivo si avvale di strumentazione digitale, i fotogrammi dovrebbero essere digitalizzati con una risoluzione di almeno 15 μ m per pixel, preferibilmente di 10-12 μ m per pixel o inferiore. La scansione deve essere effettuata con scanner di alta precisione, che garantiscano una precisione geometrica di $\pm 3\mu$ m. Prima della scansione è necessaria una taratura accurata dello scanner, per la geometria come per la radiometria. La taratura deve essere controllata periodicamente e ripetuta ogni volta che le tolleranze non sono più rispettate; è necessaria una taratura completa all'inizio ed alla fine di un progetto ed ogni 2 settimane. I protocolli di taratura devono essere inclusi nel verbale finale. Occorre fare attenzione a digitalizzare i fotogrammi sempre con il medesimo orientamento (ovvero con il report della camera sul medesimo lato).

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

5.4.10. Compensazione della triangolazione aerea e controllo di qualità

Le misure della triangolazione aerea devono essere compensate con un programma a stelle proiettive che permetta l'utilizzo di parametri aggiuntivi, quali il PAT-B della Inpho, Stuttgart, BLUH dell'Università di Hannover, ORIMA (LH-Systems) o BINGO. L'errore standard risultante dalla compensazione non dovrebbe superare $\pm 7\mu$ m (errore quadratico medio delle coordinate immagine). E' necessario verificare

la significatività dei parametri aggiuntivi. Le deformazioni residue non dovrebbero superare $50\mu\text{m}$ fino ad una distanza di 120mm dal punto principale.

L'appaltatore procederà ad un accurato controllo di qualità e metterà a disposizione del committente tutti i documenti necessari per il controllo qualità su supporto informatico e cartaceo. Fra gli altri, verranno consegnati al committente i seguenti documenti:

- relazione tecnica dettagliata sulla triangolazione aerea e sul controllo di qualità
- grafico di copertura del blocco (con i bordi dei fotogrammi), ubicazione dei punti di appoggio e loro errori residui (ottenuti attribuendo nella compensazione un peso inversamente proporzionale all'errore quadratico medio effettivo dei punti di appoggio);
- rappresentazione grafica dei legami tra i fotogrammi;
- stampa dell'output dettagliato della compensazione del blocco;
- file delle coordinate immagine misurate (compresi i punti eliminati, possibilmente evidenziati graficamente o con una numerazione del punto modificata);
- file delle coordinate dei punti di appoggio, determinati mediante misure topografiche
- file delle coordinate compensate dei punti ;
- file degli elementi di orientamento delle immagini;
- file dei punti eliminati.

5.4.11. Acquisizione dati per il DTM

La determinazione del DTM richiede l'orientamento dei modelli stereo in un restitutore. Nella compensazione della triangolazione aerea si utilizzano normalmente parametri aggiuntivi, che possono dar luogo ad errori di stima dell'orientamento. Di conseguenza, sarebbe errato limitarsi a imporre direttamente gli elementi di orientamento calcolati dalla compensazione; si consiglia piuttosto di ricalcolarli a partire dalle coordinate immagine e dalle coordinate terreno dei punti di legame ottenute dalla compensazione. Per avere maggior controllo sulle quote, si possono poi restituire le quote di almeno 4 punti di legame nel modello stereo, confrontandole con le coordinate iniziali. Le discrepanze dovrebbero rimanere entro $1/5$ della precisione richiesta per il DTM.

5.4.11.1 Generazione automatica del DTM:

I metodi di correlazione automatica delle immagini possono costituire una tecnica efficiente di determinazione del DTM; è tuttavia necessario prevedere un editing accurato, che richiede grande esperienza e capacità: si deve fra l'altro tener conto di possibili differenze sistematiche tra le quote restituite dalla macchina e l'operatore incaricato dell'editing e provvedere al controllo ed integrazione degli elementi lineari (breaklines...) misurati. Le tecniche e le procedure operative variano fortemente da un pacchetto software all'altro: di conseguenza, si raccomanda di accettare questa procedura chiedendo comunque all'appaltatore di fornire una descrizione dettagliata dei metodi che intende applicare e di come intende garantire il controllo di qualità. 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 breaklines, delle aree morte e delle aree di minor precisione.

5.4.11.2 Generazione del DTM da misure stereo

Per la loro qualità ottica superiore, queste misure vengono generalmente eseguite su restitutori analitici. Poiché la procedura di orientamento dell'immagine è in qualche modo diversa rispetto a quella con immagini digitali, è importante rideterminare correttamente gli elementi di orientamento come sopra indicato e controllarli su almeno 4 punti di legame ben distribuiti.

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

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

Quale metodo debba essere adottato dipende molto dall'esperienza e dalla capacità degli operatori. Anche in questo caso viene lasciato all'appaltatore il compito di fornire una descrizione dettagliata dei metodi da applicare e di come venga garantito il controllo di qualità. Resta inteso che il risultato finale deve essere un reticolo a punti regolari con l'ampiezza di maglia indicata e, ove necessario, l'insieme delle breaklines, delle aree morte e delle aree di minor precisione. Si dovrà fare grande attenzione ad evitare errori sistematici: a tale scopo devono essere documentati gli errori personali degli operatori e gli errori dovuti a variazioni nella temperatura ambiente.

5.4.12. Completamento del rilievo in campagna e controllo di qualità

Può accadere che alcune aree, comprese tra quelle da rilevare, non possano essere restituite con la necessaria precisione mediante la fotogrammetria. In queste zone l'appaltatore deve allora rilevare direttamente, con metodi topografici, i dati per il DTM.

Il controllo di qualità dell'appaltatore dovrebbe concentrarsi sulla restituzione manuale per via fotogrammetrica. In linea di massima egli è libero di scegliere il metodo più idoneo. Gli è richiesto tuttavia di misurare anche dei profili nei modelli fotogrammetrici definiti per valori interi di coordinate, in modo da attraversare ogni modello sia in direzione Est-Ovest sia in direzione Nord-Sud. I punti lungo il profilo vanno misurati con una densità 5 volte superiore alla normale spaziatura della griglia del DTM. Essi servono come punti di controllo, pertanto le loro quote vanno confrontate con quelle interpolate dal DTM finale. In nessun punto le discrepanze tra valori misurati ed interpolati del profilo devono eccedere la precisione richiesta al DTM di un fattore superiore a 1.5.

L'appaltatore produrrà una relazione tecnica sulla determinazione del DTM secondo le indicazioni del committente. Tale relazione analizzerà in dettaglio la precisione del DTM ed i risultati dei controlli di qualità effettuati dall'appaltatore. Questi fornirà inoltre le misure dei profili e le quote interpolate in forma numerica. Verranno infine date informazioni sulle componenti di errore sistematiche, compresi gli errori personali degli operatori e gli errori sistematici dovuti ad alterazioni della temperatura ambiente.

5.4.13. Trasformazione dei dati nel formato standard del DTM

Nell'ultima fase del lavoro si calcolano per interpolazione le quote dei punti sui nodi della griglia stabilita e si convertono gli elementi lineari (breaklines, ecc...) nel formato richiesto (DXF). I dati vengono memorizzati su CD-ROM.

5.5. Impiego del LIDAR nell'acquisizione dati per i DTM

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

In molti paesi sono in corso di elaborazione specifiche e standard relativi all'utilizzo del LIDAR. La gran parte di quanto segue è stato ripreso dalle normative pubblicate

dall'Ente Federale di Gestione delle Emergenze (FEMA, USA, http://www.fema.gov/mit/tsd/lidar_4b.htm), da un Gruppo di Lavoro del Survey Department dei Länder (Germania), dal Survey Department (Rijkswaterstaat) olandese e dal Servizio Topografico svizzero.

5.5.1. 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 od elicotteri, utilizzato per acquisire coordinate x , y , z di punti del terreno e di sue caratteristiche, siano esse naturali o artificiali. I sistemi LIDAR aviotrasportati comprendono un ricevitore GPS, una Unità di Misura Inerziale (IMU) ed un telemetro laser a scansione; sono poi necessarie stazioni GPS a terra per il posizionamento differenziale.

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

La procedura per ottenere le coordinate 3-D 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 DTM)

Si presenta dapprima la procedura per l'acquisizione dei dati e successivamente le

elaborazioni eseguite dall'appaltatore nell'attuale stato di sviluppo della tecnologia.

5.5.2. Caratteristiche dell'acquisizione dati con LIDAR

Un LIDAR o scanner laser costituisce un sistema integrato formato da un ricevitore GPS, un distanziometro laser, un sistema di scansione ed 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 GPS 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.

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 della luce. Su determinati materiali la luce può essere completamente assorbita. Le proprietà di riflessione della superficie del terreno dipendono dalla lunghezza d'onda del laser e variano considerevolmente con la natura della superficie, ad esempio se è molto brillante (neve) o molto scura (asfalto).

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

- la maggior parte dei sistemi utilizza solo un impulso di durata molto breve. La distanza viene quindi stabilita misurando il tempo di volo dell'impulso. Dato che il raggio laser nel suo tragitto verso la superficie del terreno può toccare diversi ostacoli, particolarmente nelle zone boschive, ne possono risultare riflessioni multiple. Su alcuni sistemi il telemetro permette, con adeguate impostazioni operative, di registrare il primo, l'ultimo o tutti gli echi di un singolo impulso inviato. Per la ricostruzione della superficie del terreno si utilizzano generalmente gli ultimi echi (last pulse) (es. ditta: TopScan; altimetro laser: Optech).
- il sistema della ditta GeoScan impiega 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 misurati i punti. Se il raggio laser colpisce oggetti di altezze diverse, si ottiene un valore di fase corrispondente alla distanza media dai punti colpiti.

5.5.3. Determinazione e selezione dei punti appartenenti al terreno

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

1. determinazione della posizione dell'aereo con GPS differenziale (DGPS), che richiede almeno una stazione di riferimento ad una distanza non superiore a 50 km ed una frequenza di misura della posizione non inferiore a 1 Hz. Le posizioni dell'aereo vengono interpolate fra quelle misurate e consentono di definire il punto origine per la misura di distanza, tenendo conto dell'istante di emissione dell'impulso e dell'eccentricità dell'antenna rispetto al telemetro.
2. per poter determinare la direzione del vettore si ottengono, grazie al sistema inerziale, gli angoli di rotazione tra il sistema di riferimento oggetto ed un sistema solidale all'IMU, previa calibrazione del sistema.
3. 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. Le successive fasi di elaborazione dati variano invece significativamente da sistema a sistema. La determinazione dei punti laser viene effettuata nel sistema ETRF89. Per la trasformazione finale nel sistema nazionale, si richiedono dati geodetici complementari (parametri di trasformazione e ondulazione del geoide).

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. Esse hanno in comune l'ipotesi che il punto di quota minima rispetto ad una superficie interpolante locale sia, con molta probabilità, un punto effettivamente appartenente al terreno; al contrario, i punti di quota più elevata rispetto a tale superficie rappresentano probabilmente vegetazione o edifici. 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.

5.5.4. Pianificazione delle fasi del lavoro e controllo di qualità

La pianificazione del lavoro deve includere una dettagliata stima del costo delle varie fasi, deve essere effettuata prima della presentazione dell'offerta e la maggior parte dei suoi elementi dovrebbe farne parte. Di conseguenza, dovrebbero rientrare nell'offerta i seguenti elementi:

- descrizione dettagliata della procedura esecutiva prescelta;
- tempistica di ogni operazione;
- descrizione dettagliata del controllo qualità, della sua tempistica e della documentazione messa a disposizione del committente per il controllo di qualità;
- costi delle singole operazioni, dettagliate per le varie fasi del lavoro.

L'incarico deve essere affidato solo a ditte certificate secondo le norme ISO e selezionate attraverso una **pre-qualificazione**. Questo assicura che la Ditta ha dimostrato, in lavori analoghi, di avere le capacità tecniche necessarie alla loro esecuzione e di rispettare le norme di capitolato, il calendario esecutivo ed i prezzi.

5.5.5. Calibrazione del sistema

Per il loro livello di sofisticazione, i componenti del sistema LIDAR vengono collaudati e tarati nel modo più corretto solo da parte del costruttore. L'appaltatore deve perciò fornire al Committente dimostrazione che sia stata effettuata una taratura da parte del fabbricante.

Oltre a ciò, l'appaltatore deve dimostrare che il sistema LIDAR nel suo complesso è stato calibrato prima dell'inizio del progetto, al fine di identificare e correggere gli errori sistematici. La corretta taratura del sistema esige il sorvolo ripetuto di zone del terreno di dimensione e quota nota e documentata, secondo parametri di volo simili a quelli che verranno utilizzati nell'area oggetto di studio.

5.5.6. Progetto del piano di volo

Redigere un piano di volo che prenda in considerazione tutti gli aspetti dell'acquisizione dati costituisce un punto cruciale per il successo della missione.

L'analisi dell'area da rilevare, i requisiti di progetto, la topografia della zona, la prossimità a spazi aerei regolamentati ed altri fattori determineranno il piano di volo definitivo. Il volo è normalmente effettuato sorvolando l'area con strisciate parallele e, ai fini del controllo di qualità, eseguendo almeno una strisciata trasversale per ciascuna giornata di ripresa. L'interasse tra le strisciate dipenderà dall'entità del ricoprimento trasversale desiderato e dal tipo di terreno.

La densità e precisione dei dati rilevati può variare notevolmente da sistema a sistema. L'appaltatore dovrà fornire un piano di volo atto a generare la densità di punti necessaria a soddisfare i requisiti di spaziatura e precisione del grigliato finale, nonché a minimizzare il verificarsi di lacune (vuoti) di dati, dovuti ad esempio a visuali occluse.

La densità dei dati grezzi LIDAR, rilevati con spaziatura casuale, e la distanza tra i nodi della griglia del DTM costituiscono i due parametri principali per definire il piano di volo. La densità punti necessaria per rappresentare accuratamente il terreno e le sue caratteristiche dipenderà dalle condizioni di volo, dalla finalità del rilievo e dalla precisione richiesta. Come detto in precedenza, una spaziatura di 5 metri tra i punti del DTM è sufficiente a rappresentare il terreno con una precisione di ± 30 or ± 15 cm, ossia la precisione tipica del LIDAR in quota.

L'appaltatore deve verificare il PDOP nell'area da rilevare. Il PDOP è un indicatore della precisione di posizione offerta dalla geometria dei satelliti GPS ad ogni epoca di misura; tanto minore è il suo valore, tanto maggiore la qualità dei dati. L'appaltatore deve documentare data, ora, quota di volo, velocità relativa al suolo, angolo di scansione, velocità di scansione, frequenza degli impulsi laser ed altre informazioni ritenute pertinenti.

L'appaltatore predisporrà il piano di volo su cartografia alla scala 1:25.000 o 1:50.000 riportando i limiti dell'area interessata. Dovrà poi evidenziare le aree che richiedono un trattamento speciale, ad esempio le vallate incassate.

Successivamente al volo, l'appaltatore fornirà un resoconto sulla quota di volo mantenuta, la velocità relativa al suolo, l'angolo e la frequenza di scansione impiegati, la frequenza di impulsi del laser ed altre informazioni, relative al volo ed alla strumentazione, ritenute opportune; preparerà inoltre una mappa delle zone ad elevato PDOP oppure una lista con l'indicazione dell'ora di inizio e di fine dei periodi con PDOP critici.

Il volo effettuato dovrà coprire la zona oggetto di studio in modo soddisfacente, con strisciate sia parallele sia trasversali, sufficienti ad eliminare le occlusioni e a consentire un adeguato controllo di qualità.

A differenza della fotogrammetria aerea, le missioni LIDAR possono essere eseguite indipendentemente dall'elevazione del sole sull'orizzonte. I voli possono essere effettuati di notte, se le altre condizioni lo consentono. La tolleranza del sistema LIDAR a condizioni meteorologiche avverse (venti forti, neve bagnata, pioggia, nebbia, elevata umidità, coltre di nubi basse) è generalmente superiore a quella di altri metodi fotogrammetrici. E' tuttavia risaputo che tali condizioni determinano un degrado della precisione di misura del telemetro laser. L'appaltatore dovrà perciò evitare missioni in presenza di cattive condizioni meteorologiche e attendere diverse ore, dopo periodi di pioggia intensa ed acquazzoni. Anche i voli in presenza di banchi di nebbia dovrebbero essere evitati.

Elevate densità di punti campionati possono consentire una soddisfacente penetrazione in aree a fogliame denso. Si dovranno tuttavia pianificare con attenzione i voli in presenza di copertura del terreno sia naturale (vegetazione) che artificiale (edifici). L'ampiezza di un impulso, la divergenza del raggio, la discriminazione fra il ritorno del primo e ultimo impulso e la scelta degli algoritmi di post-elaborazione possono influenzare la precisione dei dati derivati dal LIDAR in zone con fogliame denso.

La registrazione video del volo, con l'annotazione del tempo di ripresa, può a volte risultare utile.

Le video camere digitali, oggigiorno inserite nella testa del sensore laser, sono raccomandabili per memorizzare immagini digitali insieme ai dati laser, generare ortofoto delle aree rilevate per ulteriori indagini, come il riconoscimento di breaklines o altre strutture. Se i parametri di volo lo permettono è inoltre consigliabile riprendere immagini con camere fotogrammetriche.

5.5.7. Standard di esecuzione del rilievo

L'appaltatore deve fornire tutto il materiale e le attrezzature necessarie, nonché il personale con le qualifiche richieste per gestire, rilevare, documentare ed elaborare tutti i dati relativi al rilievo col sistema LIDAR, inclusa l'elaborazione digitale delle immagini riprese.

Detto d il passo di griglia del DTM, le zone prive di dati (echi registrati) con ampiezza superiore a $2d \times 2d$ sono considerate vuoti (lacune). Ad eccezione di quelli all'interno di specchi o corsi d'acqua e delle zone recentemente asfaltate (non oltre 24 ore), i vuoti nei dati grezzi non possono superare il 5% dell'area ripresa. La spaziatura del grigliato del DTM dovrà essere la minima consentita dai dati e non dovrà comunque superare 5 metri.

Gli artefatti sono zone con quote anomale che danno luogo ad oscillazioni e increspature del DTM e derivano da errori sistematici o da particolari condizioni

ambientali. Possono nascere da malfunzionamento dei sensori, strumentazione calibrata in modo non corretto, condizioni atmosferiche avverse o errori di elaborazione. Quando si verificano, l'appaltatore dovrà provvedere ad un'analisi dei loro effetti sulla precisione del DTM. L'analisi dovrà includere una descrizione delle cause (e con-cause) che li hanno provocati e la descrizione delle misure adottate per eliminarli.

5.5.8. Aree di controllo

Nel corso delle attività del progetto, è necessario prevedere aree di controllo, parte delle quali è lasciata all'appaltatore e parte è invece riservata al committente per i test di accettazione dei dati. Le aree di controllo sono porzioni di terreno le cui quote sono state rilevate topograficamente, utilizzate per correggere errori sistematici nei dati laser. Per ogni blocco di strisciate rilevato occorre prevedere due di queste zone, una utilizzata dall'appaltatore per il proprio controllo e la calibrazione, la restante a disposizione del committente per i test di accettazione.

Le aree di controllo dovrebbero avere una superficie minima di 3.000 m², con bassissima o nessuna vegetazione e dovrebbero essere distribuite regolarmente sull'intera superficie da rilevare. Al fine di rilevare eventuali inclinazioni della strisciata, è utile ubicare alcune aree di controllo sul bordo della strisciata e nelle zone di sovrapposizione tra strisciate. Le irregolarità del terreno in tali aree dovrebbero essere molto modeste. Particolari del terreno, come ad esempio piani inclinati (rampe, ecc.), possono essere adoperate per evidenziare gli errori planimetrici. Sulle aree di controllo si dovrebbe misurare un reticolo di punti con un'ampiezza di maglia abbastanza piccola, ad esempio di 10m e comunque in modo da rilevare il terreno con precisione di ± 10 cm. I campi di calcio, per la regolarità delle pendenze, sono particolarmente adatti allo scopo.

La procedura per la determinazione delle quote della zona di controllo è libera. L'impiego di GPS e teodoliti ha dato ottimi risultati; la livellazione geometrica consentirebbe una maggiore precisione. Una possibile variante consiste nella determinazione delle aree di controllo con GPS cinematico da autovetture, se si impiegano a questo scopo le strade.

Le aree di controllo dovrebbero essere definite prima del volo di rilevamento e le quote dovrebbero essere determinate al più presto. Ciò consente di tenerne conto nel corso della progettazione del volo e di sorvolarle diverse volte, specialmente se l'ampiezza della zona richiede di effettuare più voli. Le quote devono essere consegnate al committente prima che l'appaltatore inizi l'elaborazione dei dati.

5.5.9. Stazioni di riferimento GPS a terra

L'appaltatore deve scegliere accuratamente le stazioni GPS fisse, per garantire una affidabile elaborazione differenziale dei dati GPS rilevati. E' obbligatorio l'utilizzo simultaneo di due stazioni base GPS durante il volo (Nota: possono essere impiegate stazioni GPS sia pubbliche sia private). Ove possibile, le stazioni base GPS dovranno avere quota ellissoidica nota con una precisione di ± 2 cm rispetto alla rete geodetica IGM95. Per le stazioni GPS a terra l'appaltatore deve utilizzare ricevitori di tipo geodetico a doppia frequenza. La distanza stazione-aereo non può superare i 50 km.

5.5.10 Elaborazione dei dati

L'appaltatore deve fornire le quote del terreno nudo con elevata precisione e risoluzione; deve pertanto eliminare dai dati LIDAR i punti rilevati su ponti, edifici ed altre strutture e quelli sulla vegetazione. Oltre ai punti LIDAR a spaziatura casuale (dati grezzi), prima e dopo l'eliminazione dei dati associati alle strutture e alla vegetazione, l'appaltatore deve produrre un DTM del terreno in coordinate E,N con la spaziatura minima consentita dai dati (e comunque non superiore a 5 metri). Nella verifica della precisione in quota del DTM, si devono utilizzare le procedure di interpolazione lineare dei TIN (Rete Irregolare di Triangoli), includendo le breaklines.

Oltre al DTM, l'appaltatore dovrà produrre breaklines 3D per gli impluvi, gli assi fluviali, i canali di scolo, il ciglio e la base delle scarpate dei corsi d'acqua, i crinali, i cigli stradali, gli argini e le paratie, i rilevati stradali/autostradali e altre infrastrutture che possano limitare o controllare il deflusso delle acque. L'appaltatore dovrà specificare le fonti e la precisione dei dati coi quali costruire le breaklines.

Le linee di rottura possono essere determinate sulla base di dati LIDAR estremamente densi mediante procedure ampiamente automatizzate o attraverso restituzione fotogrammetrica. Poiché devono essere impiegate tecniche fotogrammetriche per controllare le misure LIDAR, in particolare per verificare se gli impulsi hanno colpito o meno il terreno nudo, in tale sede possono essere determinate le breaklines.

5.5.11. Sistema di riferimento e di coordinate

I punti laser sono riferiti al sistema EUREF/89 con altezze ellissoidiche. I dati per il DTM devono essere invece espressi nel sistema nazionale, con quote ortometriche. Per la trasformazione tra i due sistemi di riferimento, il committente dovrà fornire i dati di ondulazione del geoide e i punti di riferimento o i parametri da impiegare

nella trasformazione. I requisiti per i punti di inquadramento e per la trasformazione di datum, per l'ondulazione del geode e per il numero di stazioni a terra devono essere trasmesse con sufficiente anticipo rispetto al volo ed essere stabilite in stretta collaborazione con gli enti responsabili.

5.5.12 Documenti ed elaborati da consegnare

Tutti i documenti da consegnare devono essere predisposti secondo il contratto ed i requisiti specificati nel presente documento, incluso il formato dei metadati.

A. Prima dell'esecuzione del volo

Prima dell'esecuzione del volo, l'appaltatore deve presentare:

1. una carta a media scala (1:25000; 1:50000) che riporti i confini dell'area da rilevare e gli assi delle strisciate;
2. documentazione che specifichi quota, velocità, angolo di scansione, numero di impulsi per linea di scansione, frequenza degli impulsi laser e altri dati ritenuti opportuni, relativi al volo e all'apparecchiatura;
3. un resoconto della copertura GPS nella zona di rilievo, ottenuta da un volo di ricognizione precedente il rilievo, che dimostri l'assenza di interferenze radio o disturbi nell'area (dimostrando pertanto la fattibilità del rilievo o la necessità di prendere provvedimenti in merito)
4. un grafico delle zone con PDOP elevato, oppure un elenco che riporti l'ora di inizio e fine dei periodi con PDOP elevato.

B. Al termine dei lavori

A completamento del progetto, l'appaltatore deve presentare:

1. una relazione sul funzionamento del sistema LIDAR nel volo di ripresa;
2. un verbale di calibrazione del sistema;
3. una relazione sul volo (comprendente le coordinate della traiettoria e la posizione delle stazioni di riferimento GPS) che riporti la data della missione, l'ora, la quota di volo, la velocità relativa, l'angolo e la frequenza di scansione, la frequenza degli impulsi laser ed altre informazioni ritenute pertinenti;
4. una relazione sulle stazioni GPS a terra;
5. una descrizione delle procedure di elaborazione dei dati grezzi (filtraggio e interpolazione) impiegate per la generazione dei dati grigliati; i dati grezzi rilevati (espressi in coordinate E,N, quota ortometrica H per ogni punto)
6. una documentazione complessiva sul lavoro, che confermi:
 1. che il volo di rilevamento è stato eseguito a regola d'arte;
 2. che l'aerea rilevata è stata coperta senza lacune;

3. che nelle zone di controllo le quote dei punti laser coincidono con quelle rilevate a terra entro $\pm 15\text{cm}$ (1σ);
4. che i punti di scansione laser non presentano errori sistematici (costanti o con andamento lineare lungo le strisciate) e sono stati controllati a campione adeguatamente;
5. che i risultati del volo laser non sono stati adattati alle quote delle aree di controllo.

La relazione sul funzionamento del sistema LIDAR deve comprendere la descrizione dei metodi di elaborazione dati adottati, compreso il trattamento degli artefatti; le frequenze di scansione; l'angolo di scansione; la possibilità o meno di registrare echi multipli e la modalità operativa adottata in proposito; la precisione dei dati LIDAR acquisiti; la precisione del DTM; eventuali altri dati ritenuti opportuni; eventuali immagini riprese in contemporanea.

La relazione sul volo deve documentare la missione, la data, l'ora, l'altezza di volo, la velocità relativa ed altre informazioni ritenute pertinenti. Il verbale deve contenere informazioni relative alla traiettoria di volo derivata dal GPS (specificando le discrepanze massime tra le soluzioni relative alle due stazioni di riferimento utilizzate), fornire una descrizione dettagliata dei parametri di volo effettivi (traiettorie delle strisciate) e dei punti di controllo GPS ed includere i dati di riferimento sulle zone di controllo a terra. Il resoconto sul controllo geodetico a terra deve includere, come minimo, tutte le informazioni sulle stazioni fisse impiegate, lo stato dei ricevitori e della costellazione dei satelliti durante le misure, il tipo di materializzazione e la stabilità delle stazioni GPS.

C. Consegna dei dati in forma numerica

Oltre alla documentazione pre- e post-progetto sopra descritta, l'appaltatore deve consegnare quanto segue:

1. tutti i dati originali, i dati relativi ai punti rilevati topograficamente per colmare le lacune, i dati delle strisciate trasversali, i dati DTM del terreno nudo e le linee caratteristiche in file di dati separati;
2. la delimitazione delle zone con vegetazione e delle zone edificate (ovvero delle aree non occupate dal terreno vero e proprio)
3. il DTM su griglia regolare, memorizzato su CD-ROM standard ISO 9660 (o DVD) nel formato specificato al punto 1.4;
4. le discrepanze nelle zone di controllo, in forma grafica e numerica.

E' opportuno che i punti LIDAR degli insiemi 1 e 2 contengano un codice di strisciata (epoca di rilievo). Eventualmente, dietro accordo con l'appaltatore, tali dati

potrebbero anche essere espressi riferendoli ad un'unità di misura areale (ad es. per km²).

L'appaltatore deve consegnare i set di dati grezzi (raw) e i dati del sistema LIDAR, comprese le quote ortometriche di ciascun punto, in files ASCII delimitati da spazi, nel formato E,N,H. L'appaltatore dovrà inoltre etichettare i data sets originali nelle zone di sovrapposizione laterale e longitudinale delle diverse strisciate. Devono essere prodotte le breaklines; i files che le contengono devono contenere un record che le identifichi come tali e ne qualifichi la provenienza e la precisione.

Tutti i documenti da consegnare devono essere conformi alla proiezione, datum e sistema di coordinate specificato nel contratto. Le dimensioni di ogni file non possono eccedere 1 gigabyte, salvo indicazione contraria del committente. Ciascun file deve essere organizzato in modo da facilitare la manipolazione ed elaborazione dei dati. Dovranno inoltre essere forniti:

- Grafici delle posizioni planimetriche (impronte) di ciascun impulso rilevato, con colori diversi per ogni strisciata;
- Il DTM derivato, con eventuale prodotti successivi.

Come criterio primario di accettazione del lavoro si propone che le deviazioni fra la scansione laser e le zone di controllo siano comprese entro i ± 30 cm per il 95% dei punti. Detti criteri di accettazione riguardano le aree di controllo riservate al committente per i suoi tests.

6. Riflessioni sui costi.

I prezzi ed i costi dei rilevamenti sono molto difficili da stimare. In Svizzera venne istituito negli anni '80 un tariffario, che fu scrupolosamente osservato per circa 10-15 anni. Un numero di topografi professionisti superiore alla domanda di mercato, l'introduzione di nuove tecniche e l'outsourcing verso i paesi dell'Europa dell'Est portarono ad un drastico calo dei prezzi. Secondo il tariffario una triangolazione aerea costava allora 400.000 Lit per mentre nel frattempo le offerte erano scese a circa 100.000 Lit per fotogramma. In molti paesi europei, inclusa la Svizzera, è ora obbligatorio l'invito a presentare offerte in tutti i progetti di una certa consistenza.

Le indicazioni sui prezzi possono pertanto essere solo molto approssimative e devono essere gli enti interessati a definire le condizioni dell'appalto, in modo da ottenere i prezzi più ragionevoli. Come già detto è importante richiedere una pre-qualifica alle ditte interessate a lavorare su un dato progetto; è tuttavia anche interesse del committente evitare una politica dei prezzi eccessivamente al ribasso.

Di seguito si dà un'indicazione sui prezzi, nella speranza di poter aggiornare e

completare l'elenco nel corso delle attività del Gruppo di Lavoro.

L'I.G.M. ha valutato in circa 1 Miliardo di Lit (3000 Lit/km²) il proprio DTM. Non sono stati forniti dettagli per la diffusione dei dati, ma la Pubblica Amministrazione dovrebbe essere esentata dal pagamento del prezzo indicato.

La Compagnia Generale Ripresearee di Parma ha presentato un'offerta per la determinazione di un DTM di Livello 1 e 2 (vedi Allegati). Secondo tale offerta il prezzo è di 69.700 Lit/km² per una precisione di $\pm 7.5m$ e di 355.800 Lit/km² per una precisione di $\pm 3m$.

Durante un recente Seminario dell'OEEPE a Stoccolma sul laser a scansione e l'interferometria SAR, Bryan Mercer della Intermap (USA) ha affermato che un rilievo con laser a scansione, che soddisfi i requisiti dei Livelli 4 e 5, costa circa 1.000.000 Lit/km².

E' stato inoltre affermato che le misure con interferometria SAR sono circa 20 volte più economiche delle misure laser ma pongono rilevanti problemi nelle aree edificate e con densa vegetazione. Questo è anche il motivo per cui questa tecnica non è entrata a far parte del presente documento. In Tabella 9 si riporta un quadro riassuntivo dei prezzi sopra menzionati.

	Fornitore	Precisione	Costo per km2	Tecnica di rilievo
			in migliaia di Lit	
1	I.G.M.	$\pm 5-20m$	3	Dati da carte esistenti
2	CGR	$\pm 7.5m$	70	Fotogrammetria
3	CGR	$\pm 3m$	355	Fotogrammetria
4	Ditte diverse	$\pm 0.15-0.30m$	1000	Laser altimetro
5	Ditte diverse	$\pm 1 - \pm 2m$	50 (stima grossolana)	Radar, Laser altim.

Tabella 9: Indicazioni di massima sui prezzi per la produzione di DTM.

E' sottinteso che le cifre sopra riportate devono essere intese come valori indicativi. Occorre inoltre considerare che l'elaborazione di un DTM è difficilmente il solo prodotto di un volo di ripresa: i fotogrammi ripresi contestualmente possono essere usati per la produzione di ortofoto ed anche per la restituzione numerica vettoriale. Occorre pertanto sviluppare un quadro complessivo dei costi, in base al quale scegliere la procedura più conveniente.

7. Raccomandazioni per i futuri sviluppi e la gestione dei DTM in Italia.

7.1. Considerazioni economiche sul completamento dei DTM regionali.

Rispetto all'obiettivo di ottenere un DTM nazionale per la produzione di ortofoto e per studi ambientali dobbiamo constatare che esistono già due coperture complete a livello nazionale:

1. Il DTM dell'I.G.M. nel sistema ED50 con una precisione di $\pm 10\text{m}$ per la maggior parte dell'Italia; si ha una precisione inferiore in Sicilia e nella zona Nord-Ovest; in molte zone delle Alpi la precisione è solo di $\pm 50\text{m}$. Le nuove sezioni al 25000, che interessano il 10% circa del territorio, hanno un livello di precisione maggiore, pari a circa $\pm 5\text{m}$, ma il ritmo di aggiornamento non è molto elevato.
2. Il DTM "It2000" della Compagnia Generale Ripreseeree di Parma, derivato dalle CTR e da foto aeree alla scala 1:75.000, con una precisione di $\pm 5\text{m}$.

La maggior parte delle Regioni dispone inoltre di DTM locali derivati dalle CTR che coprono gran parte del territorio (cfr. Tabella 5). La precisione varia considerevolmente, ma dovrebbe essere dell'ordine di quella di "It2000".

L'obiettivo primario deve essere quello di assicurare che le Regioni dispongano entro breve di un DTM per la produzione di ortofoto 1:10.000 e 1:5.000 e per studi ambientali. Tuttavia i requisiti di precisione derivati per le ortofoto mostrano che per ottenere ortofoto 1:10.000 senza restrizioni sulla distanza principale della camera da presa occorre un DTM di livello 2. Questo significa che l'attuale standard di precisione dei dati in possesso delle Regioni è insufficiente e obbliga ad usare una camera con campo normale per nuove ortofoto. E' difficile valutare attualmente quali siano i costi di un nuovo rilievo con precisioni superiori al livello 1 o i costi da sostenere per completare le aree restanti con l'aiuto delle CTR esistenti. Come alternativa si può considerare l'uso di immagini ad alta risoluzione da satellite, per ottenere rapidamente una copertura alla scala 1:10.000.

Gli altri aspetti non ancora affrontati riguardano i requisiti specifici degli studi ambientali. Alcuni problemi possono essere risolti da un DTM di Livello 2, tuttavia aree pianeggianti a rischio di inondazione ed aree urbane richiedono livelli più elevati, preferibilmente il Livello 4 o addirittura il Livello 5.

Sarebbe pertanto molto importante aggiornare l'inventario dei dati esistenti,

completarlo con le specifiche esigenze delle Regioni ed iniziare una valutazione globale dei costi, che non si limiti alla produzione del DTM, ma includa anche quella delle ortofoto e della cartografia numerica vettoriale. Lo studio dovrebbe anche tener presente i costi per l'accesso ai dati, i costi per la digitalizzazione delle carte e i costi di impiego di nuove tecniche, inclusi i nuovi altimetri laser capaci di operare da quote maggiori o eventualmente le tecniche radar.

7.2. Gestione dei DTM regionali.

Questo Gruppo di Lavoro è stato incaricato dalle Regioni, attraverso il CTC, di produrre specifiche per un DTM; ciascuna Regione tuttavia ha autonomia amministrativa e decisionale in materia. La tendenza al decentramento, per le amministrazioni come per le strutture private, è certamente positiva in termini di efficienza e di costi: l'accentramento nella gestione della cosa pubblica come nelle strutture private non porta a una ottimizzazione dei costi. Il decentramento dovrebbe quindi essere incoraggiato. Sotto questo profilo, in Italia le Regioni hanno un forte ruolo nel settore topo-cartografico; anche alcune aziende private del settore sono fortemente dinamiche. Tuttavia il decentramento rende più difficoltoso l'accesso ai dati da parte degli utenti generici e le ditte private potrebbero perciò essere tentate di costruire una situazione di monopolio. Questo problema potrebbe essere superato offrendo l'accesso gratuito ai dati tramite Internet, secondo procedure regolamentate. A lungo termine questo non ridurrebbe affatto il campo d'azione dell'iniziativa privata, poiché il livello di educazione tecnologica necessario per un uso appropriato dei dati topografici e dei DTM in particolare è considerevole: al contrario, ne assicurerebbe il progresso continuo. In tal modo si potrebbe evitare l'istituzione di una struttura centrale per la gestione dei dati del DTM e nello stesso tempo goderne dei vantaggi.

Se si osserva il settore della produzione cartografica, si può notare che numerose ditte private hanno già intrapreso iniziative simili con notevole successo, il che ha assicurato loro una posizione leader nel mercato. E' difficile valutare a priori quale sarebbe il successo commerciale ma, considerando la situazione in Italia, è auspicabile che l'I.G.M., come ente statale, si indirizzi in tale direzione, assumendo un ruolo trainante nel settore. In tal modo esso potrebbe definire gli standard per la diffusione dei dati e beneficiare della sua posizione-guida nel settore. Sarebbe allora più semplice per le Regioni seguire gli standard elaborati e certamente le ditte private non mancherebbero di entrare in competizione.

Pertanto, all'interno dell'Intesa Stato-Regioni, i dati numerici o i DTM attualmente disponibili presso le Regioni potrebbero essere messi a disposizione gratuitamente di tutte le amministrazioni pubbliche; i dati e i metadati dovrebbero essere disponibili

su Internet sui siti degli uffici cartografici regionali e su un sito nazionale, gestito dall'I.G.M.

Si raccomanda inoltre che i medesimi dati siano resi disponibili a tutti gli utenti, richiedendo come contropartita la collaborazione nel miglioramento dei dati e la possibilità di pubblicare su Internet i relativi aggiornamenti, ovviamente alle medesime condizioni.

Le regole di accesso, valide anche per altri enti a livello nazionale o regionale, dovrebbero essere definite e formalizzate dal CTC; potrebbero naturalmente essere adottate norme differenziate in relazione al tipo di dati ed al livello gerarchico degli stessi.

O. Kölbl

Lausanne, April 29 2001

Traduzione: G. Forlani

Parma, 14.9.2001

Allegato 1: Stima dei costi per la formazione di un DTM per l'intero territorio italiano, formulata dalla "Compagnia Generale Ripresearee" di Parma..

Valutazione costo DTM

Italia superficie ettari 30'132'300

Ipotesi A: DTM per ortofoto di precisione standards

A -Precisione altimetrica	m	7.5
B -Distanza tra i nodi del grigliato	m	25
C -Scala fotogrammi ripresa aerea	1 : 35.000-40.000	
D -N° fotogrammi previsti	circa	21'500
E -N° modelli stereoscopici	circa	21'000

Il costo per realizzare questo DTM che comporta:

- apposita ripresa aerea
- Inquadramento utilizzando punti noti pre-esistenti (**escluso il costo per nuovi punti**)
- preparazione, osservazioni strumentali e calcolo TA
- Acquisizione dati numerici per correlazione o curve di livello e break-linee
- Elaborazione dati con creazione griglia a maglia quadrata per aree omogenee

Costo presunto totale	N°	21'000	a lire/cad.	Costo per modello	1'000'000	Lire	21'000'000'000
-----------------------	----	--------	-------------	-------------------	-----------	------	----------------

Costo unitario per ettaro Lire 697

Prezzo perfettamente allineato con il prezzo applicato in Austria dove per la cessione di un analogo DTM si applica il prezzo di lire 646 per ettaro

Ipotesi B: DTM per ortofoto di precisione

A -Precisione altimetrica	m	3.0
B -Distanza tra i nodi del grigliato	m	25
C -Scala fotogrammi ripresa aerea	1 : 12.000-15.000	
D -N° fotogrammi previsti	circa	137'000
E -N° modelli stereoscopici	circa	134'000

Il costo per realizzare questo DTM che comporta:

- apposita ripresa aerea
- Inquadramento utilizzando punti noti pre-esistenti (**escluso il costo per nuovi punti**)
- preparazione, osservazioni strumentali e calcolo TA
- Acquisizione dati numerici per correlazione o curve di livello e break-linee
- Elaborazione dati con creazione griglia a maglia quadrata per aree omogenee

Costo presunto totale	N°	134'000	a lire/cad.	Costo per modello	800'000	Lire	107'200'000'000
-----------------------	----	---------	-------------	-------------------	---------	------	-----------------

Costo unitario per ettaro Lire 3'558

Prezzo perfettamente allineato con il costo di un analogo DTM eseguito in Austria per lire 3.470 all'ettaro