
Esperienze di filtraggio, classificazione, segmentazione e modellazione di dati spaziali da rilievo laser aereo

Parole chiave > Laser, Filtraggio, Classificazione, Segmentazione, Modellazione.

Riassunto > L'articolo prende in considerazione le diverse fasi operative che caratterizzano il rilevamento laser; fra queste si illustrano sinteticamente le fasi iniziali di acquisizione e di georeferenziazione, mentre si dedica particolare attenzione a quelle successive di filtraggio, classificazione, segmentazione e modellazione, evidenziando alcuni aspetti salienti sulla base delle esperienze maturate dalle elaborazioni di varie tipologie di dati. Per ogni fase vengono descritti inoltre i modelli analitici, gli algoritmi implementati e le sperimentazioni numeriche condotte dal gruppo di ricerca dell'Università di Udine che opera nell'ambito del progetto INTERREG IIIA Phare/CBC Italia-Slovenia "Ricomposizione della cartografia catastale e integrazione della cartografia tecnica regionale numerica per i Sistemi Informativi Territoriali degli Enti Locali mediante sperimentazione di nuove tecnologie di rilevamento" svolto in collaborazione con il *Geodetski Institut Slovenije* di Lubiana.

Abstract >The paper describes the operative steps of an aerial laser scanning survey; among these, the initial procedures for acquisition and geo-referencing are briefly illustrated, while more attention is given to the filtering, classification, segmentation, and modelling phases. For these last topics, several fundamental aspects on the basis of experiences developed processing different kinds of laser data are reported. For every phase, the analytical models, the implemented algorithms and numerical experimentation realized by the research group of the University of Udine are described. This last activity is within the INTERREG IIIA Phare/CBC Italy-Slovenia project "Cadastral map updating and regional technical map integration for the Geographical Information Systems of regional agencies by testing advanced and innovative survey techniques" in cooperation with the *Geodetski Institut Slovenije* of Ljubljana.

Fabio CROSILLA
Dipartimento di Georisorse e Territorio
Università di Udine
via Cottonificio, 114
33100 UDINE
t 0432558716
f 0432558700
e crosilla@dgt.uniud.it

Domenico VISINTINI
Dipartimento di Georisorse e Territorio
Università di Udine
via Cottonificio, 114
33100 UDINE
t 0432558719
f 0432558700
e visintini@dgt.uniud.it

Guido PREARO
Dipartimento di Georisorse e Territorio
Università di Udine
via Cottonificio, 114
33100 UDINE
t 0432558746
f 0432558700
e gprearo@libero.it

Barbara FICO
Dipartimento di Georisorse e Territorio
Università di Udine
via Cottonificio, 114
33100 UDINE
t 0432558746
f 0432558700
e barbara-fico@libero.it

Introduzione > La scansione laser aerea consente di ottenere oggi un rilievo del territorio caratterizzato da standard di automazione, produttività e risoluzione impensabili fino a poco tempo fa. In condizioni normali, in un solo secondo di volo si possono misurare fino a 50.000-80.000 punti nelle tre componenti con precisione decimetrica e risoluzione a terra fino a 10-20 punti/mq.

Le caratteristiche, le potenzialità ed i risultati del rilievo laser sono sufficientemente noti e sono ampiamente descritti nella vasta letteratura del settore. La prima raccolta organica era stata pubblicata già nel 1999 nel *Special Issue on "Airborne Laser Scanning"* del *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (a cura di Wehr e Lohr, 1999); a livello nazionale, si segnalano invece il Supplemento Speciale al n. 2/2001 del Bollettino SIFET (2001) ed il volume "La tecnica del laser scanning: teoria e applicazioni" (a cura di Crosilla e Galetto, 2003) per un recente Stato dell'Arte dell'argomento.

Ciò premesso, i principali parametri geometrici che caratterizzano ogni rilievo laser sono (Casella, 2003):

- la frequenza di scansione: la densità di campionamento a terra risulta direttamente proporzionale;
- le modalità di acquisizione: la densità e la produttività aumentano con il numero di risposte (*echoes*) memorizzate;
- l'altezza di volo: la produttività è direttamente proporzionale, mentre la densità, la precisione e il rischio di occlusioni sono inversamente proporzionali;
- l'angolo di apertura massima di scansione (*swath*): produttività e rischio di occlusioni sono direttamente proporzionali, mentre la densità e la precisione risultano inversamente proporzionali.

I principali vantaggi del rilievo laser aereo si possono sinteticamente riassumere in:

- Notevole produttività: generazione automatica di "nuvole" di milioni di punti 3D;
- Elevata qualità metrica del rilievo: accuratezza di 10-20 cm;
- Alta densità di campionamento: fino anche a 30 punti/mq;
- Completa indipendenza della ripresa dalla luminosità dell'ambiente;

- Informazione della risposta radiometrica del segnale;
- Possibilità di "bucare" la vegetazione, considerando opportunamente le risposte multiple.

I prodotti ottenibili in modo semi-automatico sono:

- Modelli Digitali della Superficie (*Digital Surface Model*, DSM) e del Terreno (*Digital Terrain Model*, DTM) e delle Elevazioni (*Digital Elevation Model*, DEM);
- Modelli numerici tridimensionali di pendici, alvei fluviali e bacini montani;
- Stima della biomassa boschiva;
- Stima della volumetria dell'edificato urbano;

Quest'ultima opportunità risulta di grande interesse per applicazioni urbanistiche e di pianificazione territoriale, soprattutto se il rilievo prevede un elevato grado di dettaglio e una notevole precisione nella modellazione dell'edificato, così da realizzare dei veri e propri *3D City Models*. Anche per questo motivo, il rilievo laser di aree urbanizzate costituisce un argomento di ricerca di prioritario interesse da parte dell'unità di Udine.

Infine, le fasi principali di un rilievo laser sono rispettivamente:

1. Acquisizione (automatica) dei dati;
2. Georeferenziazione (automatica) dei dati;
3. Allineamento (semi-automatico) dei punti;
4. Filtraggio (automatico) dei punti;
5. Classificazione (semi-automatica) dei punti;
6. Segmentazione (automatica) dei punti "edificio";
7. Modellazione 3D (semi-automatica) degli edifici;
8. Produzione dei file di consegna.

Si può tuttavia osservare che non tutte le fasi sono di pertinenza dell'utente che ha commissionato il rilievo laser: le fasi 1 & 2 sono eseguite dalle (poche) ditte che eseguono il volo. Inoltre le fasi 6 & 7 non vengono realizzate per applicazioni di tipo ambientale, idro-geologico o forestale.

1. L'acquisizione dei dati

Il principio di funzionamento si basa sull'emissione di impulsi laser diretti da una sorgente verso uno specchio oscillante che a sua volta li riflette lungo una direzione ortogonale a quella di avanzamento dell'aeromobile. Si genera così una scansione del

terreno derivante dalla combinazione dei due movimenti, quello di oscillazione dello specchio e quello di avanzamento dell'aeromobile. Il raggio laser, una volta colpita una superficie, viene riflesso e parte dell'energia incidente ritorna allo specchio che convoglia il segnale luminoso ad un sistema di rilevamento che misura il tempo di ritorno dell'impulso. Dal tempo impiegato dalla luce a percorrere il tragitto relativo al punto di emissione – riflessione – ricezione si può risalire al modulo della distanza che intercorre fra lo specchio ed il punto di riflessione sulla superficie (indicata con il vettore r_i^{spe} nella successiva formula [1]). Per posizionare i punti in uno spazio tridimensionale è necessario conoscere anche la direzione istantanea di questo raggio, che dipende innanzitutto dall'angolo di rotazione istantanea dello specchio (valore introdotto nella matrice di rotazione R_{spe}^{las}). Ma, a differenza del rilevamento laser terrestre, la posizione e l'assetto angolare del sistema di scansione sono anch'essi istantaneamente variabili: vanno quindi misurati e sono opportunamente combinati nel modello fondamentale di georeferenziazione [1].

Tra i diversi sistemi di acquisizione di dati laser, uno tra i più diffusi è il sistema ALTM 3033 della Optech (www.optech.on.ca) costituito da un laser allo stato solido operante nell'infrarosso vicino ($\lambda=1.063$ nm) che invia impulsi di luce alla frequenza massima di 33 kHz (vedi Figure 1).

Figura 1 - Sistema Optech ALTM 3033: a sinistra il solo sensore laser, a destra l'intero sistema (da www.optech.on.ca).



Con questo sistema sono stati eseguiti alcuni rilievi sperimentali su alcune aree campione del Friuli Venezia Giulia nell'ambito del progetto comunitario INTERREG IIIA sopra citato: le diverse scansioni sono state accuratamente pianificate, sia per quanto concerne le caratteristiche temporali della costellazione GPS, sia per quanto concerne i parametri di acquisizione. Le misure GPS differenziali cinematiche per il posizionamento istantaneo del sistema facevano riferimento ad almeno una stazione fissa (*master*) situata entro 30 km dall'area del rilievo, con ricevitori di tipo geodetico e misura su ambedue le bande L1 ed L2.

Per le campagne di rilievo 2003-2004, sono state scelte alcune aree di particolare interesse per problematiche di carattere idrogeologico e di

analisi del territorio montano, che sono argomento di indagine del progetto INTERREG IIIB "Catchrisk" della Direzione Centrale delle Risorse Agricole, Naturali e Forestali della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia. Sono stati rilevati i seguenti bacini montani con una densità di campionamento al suolo comunque superiore a 2 punti al metro quadrato (vedi Figure 26):

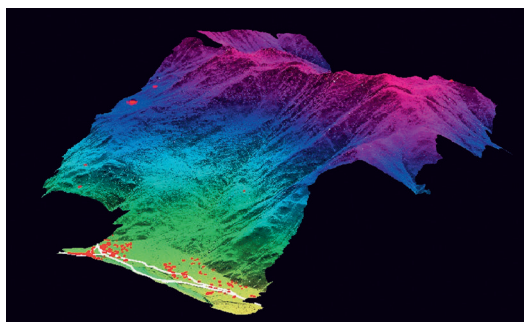
- Bacino del rio Moscardo in comune di Paluzza (UD);
- Bacino del rio Agozza in comune di Forni di Sopra (UD);
- Bacino del rio Miozza in comune di Ovaro (UD);
- Bacino del rio degli Uccelli in comune di Pontebba (UD).
- Bacino del rio delle Rose in comune di Gorizia.

Nelle corrispondenti tabelle si riportano alcune delle caratteristiche dei rilievi eseguiti su questi bacini: si osservi come per ogni bacino siano stati rilevati mediamente più di 50 milioni di punti 3D.

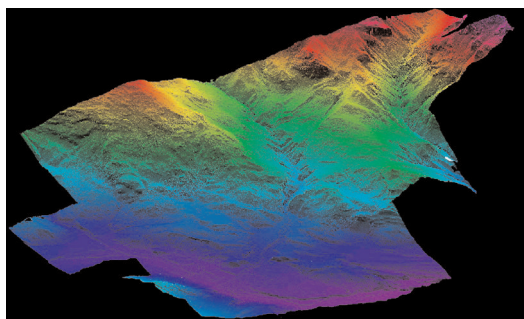
Figura 2 - Rilievo laser del bacino del rio Moscardo: a sinistra, DSM ricostruito dai dati, e a destra, caratteristiche principali del rilievo.

Figura 3 - Rilievo laser del bacino del rio Agozza: a sinistra, DSM ricostruito dai dati, e a destra, caratteristiche principali del rilievo.

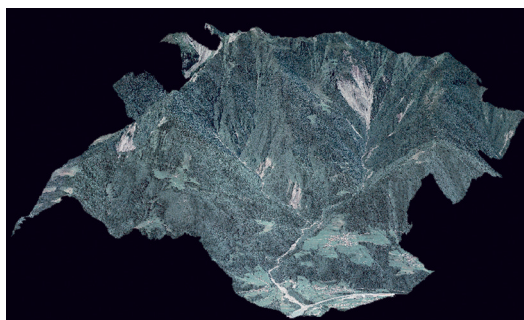
Figura 4 - Rilievo laser del bacino del rio Mozza: a sinistra, DSM ricostruito dai dati, e a destra, caratteristiche principali del rilievo.



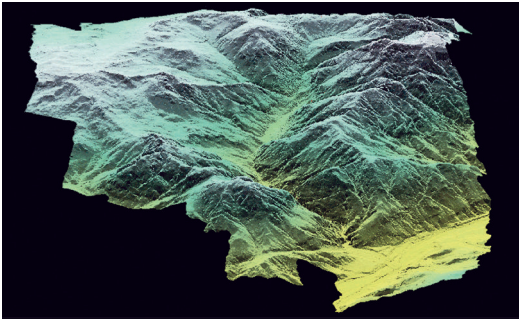
Numero di punti	55.219.558
Numero di strisciate	11
Densità media	2 p.ti/mq
Superficie 2D	1.364,54 ha
Superficie 2,5D	2.256,98 ha
Morfologia del terreno	montuosa-pianeggiante
Periodo di acquisizione	novembre 2003
Valore massimo quota	2.092,75 m [WGS84]
Valore minimo quota	564,71 m [WGS84]



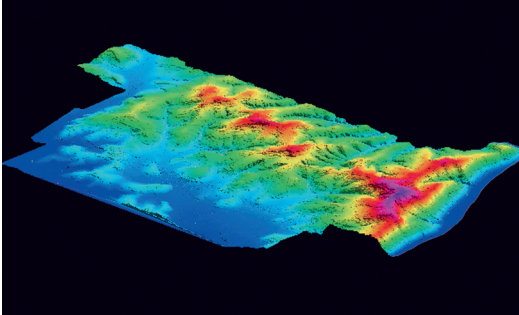
Numero di punti	46.030.552
Numero di strisciate	11
Densità media	3 p.ti/mq
Superficie 2D	1.405,60 ha
Superficie 2,5D	1.508,35 ha
Morfologia del terreno	montuosa-pianeggiante
Periodo di acquisizione	novembre 2003
Valore massimo quota	2.129,15 m [WGS84]
Valore minimo quota	855,89 m [WGS84]



Numero di punti	84.318.706
Numero di strisciate	13
Densità media	2,5 p.ti/mq
Superficie 2D	2.384,24 ha
Superficie 2,5D	2.978,73 ha
Morfologia del terreno	montuosa-pianeggiante
Periodo di acquisizione	novembre 2003
Valore massimo quota	2.124,34 m [WGS84]
Valore minimo quota	514,71 m [WGS84]

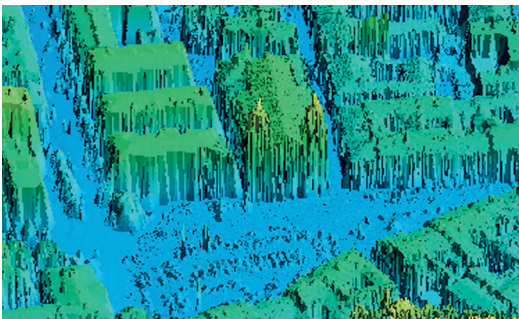


Numero di punti	74.458.802
Numero di strisciate	12
Densità media	5 p.ti/mq
Superficie 2D	2.715,97 ha
Superficie 2,5D	3.906,03 ha
Morfologia del terreno	montuosa
Periodo di acquisizione	novembre 2003
Valore massimo quota	2.044,89 m [WGS84]
Valore minimo quota	606,41 m [WGS84]



Numero di punti	41.015.811
Numero di strisciate	10
Densità media	3 p.ti/mq
Superficie 2D	1.602,39 ha
Superficie 2,5D	2.002,99 ha
Morfologia del terreno	collinare-pianeggiante
Periodo di acquisizione	aprile 2004
Valore massimo quota	177,78 m [WGS84]
Valore minimo quota	101,27 m [WGS84]

Il centro storico di Gorizia è stato inoltre identificato come caso di studio per la sperimentazione della scansione laser ai fini di applicazioni a carattere urbanistico, anche alla luce delle problematiche di pianificazione transfrontaliera là esistenti. Sono state eseguite due scansioni a diversa densità di campionamento medio al suolo: a 2 punti/mq (Figura 7) e a 15 punti/mq (Figura 8) per studiare le problematiche di modellazione dell'edificato. Durante il volo sono state anche acquisite immagini digitali per realizzare un'ortofoto ad alta risoluzione, come sarà illustrato successivamente.

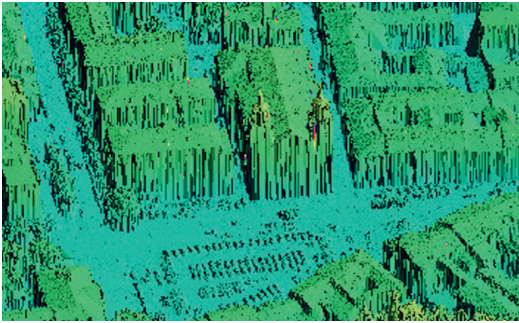


Numero di punti	10.527.138
Numero di strisciate	11
Densità media	2 p.ti/mq
Superficie 2D	566,60 ha
Superficie 2,5D	648,78 ha
Morfologia del terreno	collinare-pianeggiante
Periodo di acquisizione	novembre 2003
Valore massimo quota	108,39 m [WGS84]
Valore minimo quota	51,34 m [WGS84]

Figura 5 - Rilievo laser del bacino del rio degli Uccelli: a sinistra, DSM ricostruito dai dati, e a destra, caratteristiche principali del rilievo.

Figura 6 - Rilievo laser del bacino del rio delle Rose: a sinistra, DSM ricostruito dai dati, e a destra, caratteristiche principali del rilievo.

Figura 7 - Rilievo laser a bassa densità della città di Gorizia: a sinistra, particolare del DSM ricostruito dai dati, e a destra, caratteristiche principali del rilievo.



Numero di punti	20.353.673
Numero di strisciate	14
Densità media	15 p.ti/mq
Superficie 2D	166,64 ha
Superficie 2,5D	199,97 ha
Morfologia del terreno	collinare-pianeggiante
Periodo di acquisizione	aprile 2004
Valore massimo quota	108,51 m [WGS84]
Valore minimo quota	57,32 m [WGS84]

Tutti gli esempi e le elaborazioni numeriche presentati in questo articolo sono stati condotti a partire da queste due scansioni laser.

2. La georeferenziazione dei dati

A differenza del rilevamento fotogrammetrico costituito dalle fasi di "orientamento delle immagini" e di "restituzione dei punti", dal punto di vista analitico, il rilevamento laser fa riferimento ad un'unica fase di "georeferenziazione dei dati".

In Figura 9 è illustrato lo schema geometrico del rilievo di un generico punto oggetto i incognito (in rosso), distinguendo le grandezze misurate con gli strumenti di navigazione (in blu), con il sensore laser (in magenta) e mediante procedure di calibrazione (in verde).

La posizione incognita r_i^{map} si può considerare come il vettore risultante delle tre trasformazioni sotto-indicate.

Figura 8 - Rilievo laser ad alta densità della città di Gorizia: a sinistra, stesso particolare del DSM ricostruito dai dati, e a destra, caratteristiche principali del rilievo.

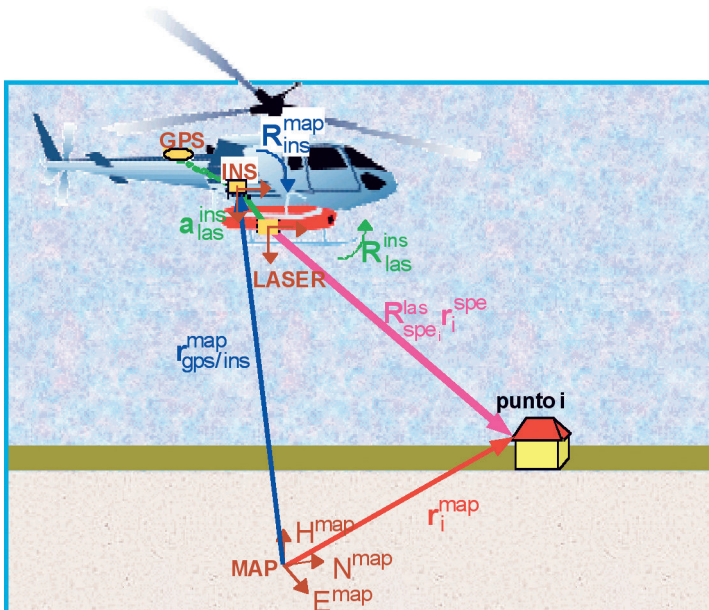


Figura 9 - Modello di georeferenziazione dei dati laser.

1. Roto-traslazione $R_{ins}^{map}, r_{gps/ins}^{map}$ dal map-frame al INS-frame (detto anche body frame)

Il vettore di traslazione istantanea $r_{gps/ins}^{map}$ è calcolato mediante l'integrazione delle misure GPS cinematiche con le misure accelerometriche inerziali (INS) acquisite e tipicamente ottenute mediante sofisticati algoritmi tipo filtro di Kalman.

Gli angoli di assetto sono invece misurati mediante giroscopi inerziali e sono introdotti nella matrice di rotazione istantanea R_{ins}^{vert} , questa premoltiplicata per le matrici R_{local}^{map} e R_{vert}^{local} , note ad ogni istante, fornisce la matrice $R_{ins}^{map} = R_{local}^{map} R_{vert}^{local} R_{ins}^{vert}$.

Si effettua pertanto la cosiddetta "georeferenziazione diretta" di un sensore, fissato rigidamente al vettore, sulla base delle sole misure di navigazione. Il sistema inerziale permette di determinare la posizione e l'assetto dell'aeromobile con una frequenza generalmente di 100 Hz. Il sistema GPS acquisisce tipicamente misure alla frequenza di 1 Hz, consentendo così di annullare la deriva nel posizionamento mediante gli accelerometri, crescente nel tempo. Valore tipico della precisione di posizione GPS è di 0,10 metri, ma tale valore dipende da una svariata serie di fattori, fra i quali si ricorda:

- la corretta pianificazione del rilievo in termini di copertura GPS (numero di satelliti, valori di PDOP e GDOP);
- la modalità di elaborazione del dato GPS (differenziale con L1, differenziale con L1 ed L2);
- la distanza fra la stazione GPS *master* e quella *rover* a bordo del velivolo;
- lo stato della ionosfera;
- lo stato della troposfera;
- la presenza di disturbi (*jamming*);
- le modalità di esecuzione del rilievo stesso (esecuzione delle scansioni, traiettorie di ingresso nell'area del rilievo).

2. Roto-traslazione $R_{las}^{ins}, r_{las}^{ins}$ dal INS-frame al LASER-frame

Il vettore di traslazione (eccentricità) costante a_{las}^{ins} fra il centro del sistema inerziale e quello laser va accuratamente misurato in modo diretto (se ciò è possibile) oppure determinato in fase di calibrazione del sistema, così come gli angoli di rotazione fra i due sistemi introdotti nella matrice .

L'influenza di questi parametri di calibrazione e gli effetti della loro imprecisione sul posizionamento di r_i^{map} più o meno significativa, ma diventa non trascurabile nei rilievi ad alta densità e può dar luogo ad errori di tipo sistematico lungo la traiettoria descritta dall'aeromobile.

3. Traslazione r_i^{las} dal LASER-frame al punto oggetto i

Questo vettore istantaneo è ottenuto dalla proiezione del vettore misurato dal laser r_i^{spe} per la matrice R_{spe}^{las} della rotazione dello specchio, come già visto al capitolo 1. Anche in questo caso si deve tener conto di eventuali errori nella misura dell'assetto angolare dello specchio e di errori sistematici nella determinazione del tempo intercorrente fra l'emissione e la ricezione dell'impulso.

La "georeferenziazione" dei dati laser può essere allora definita come una *combinazione delle tre trasformazioni 3D map-frame INS-frame LASER-frame punto oggetto*, riassunte da:

$$\mathbf{r}_i^{map} = \mathbf{r}_{gps/ins}^{map} + \mathbf{R}_{ins}^{map} \left[\mathbf{R}_{las}^{ins} \mathbf{R}_{spe_i}^{las} \mathbf{r}_i^{spe} + \mathbf{a}_{las}^{ins} \right] \quad [1]$$

Dalla [1] si osserva come il posizionamento dipenda dalla combinazione di sei grandezze vettoriali, quattro delle quali variabili istantaneamente: l'effetto finale degli inevitabili errori è assai diverso, anche all'interno della stessa strisciata. Valgono le considerazioni fatte al capitolo introduttivo circa la dipendenza dalla quota di volo e dall'angolo di scansione, ma in generale risulta fondamentale l'accuratezza e la precisione dell'assetto angolare dell'aeromobile misurato dai giroscopi inerziali.

Inoltre, le grandezze variabili della [1] sono misurate con frequenze assai diverse: dell'ordine dell'Hz per il GPS, dei 100 Hz per l'INS e dei 10.000 Hz per il laser. Si dovrà procedere allora per interpolazione tempora-

le dei dati GPS e INS, introducendo inevitabili semplificazioni, e si potranno verificare errori di asincronia (disallineamento temporale) fra i diversi sistemi.

Relativamente agli esempi di rilievo laser prima illustrati, una velocità media dell'aeromobile di 75 km/h e le misure GPS acquisite ad 1 Hz hanno permesso di ricostruire una traiettoria con un punto ogni 21 metri circa. I dati inerziali sono stati invece acquisiti ad una frequenza di 200 Hz: la traiettoria è stata quindi risolta ogni 50 millisecondi, quindi approssimativamente ogni 0,10 metri.

La terna dei giroscopi inerziali RLG (*Ring Laser Gyros*, anch'essi basati su onde laser) consente una precisione di 0°,04 in rollio e beccheggio e 0°,05 in direzione (angolo di deriva o imbardata). Le principali caratteristiche della strumentazione utilizzata sono riassunte in Tabella 1.

Tabella 1 - Caratteristiche del sistema laser Optech ALTM 3033

Altezza di volo relativa operativa	265 – 3.000 m
Precisione della distanza misurata	10 cm per singolo impulso
Risoluzione della distanza misurata	1 cm
Precisione relativa	2-4 cm alla frequenza di 2 kHz, 5-10 cm alla frequenza di 10 kHz
Angolo di scansione	variabile tra 0° e $\pm 20^\circ$
Modalità di acquisizione	misura contemporanea di First & Last pulse ed intensità
Ampiezza di scansione a terra	variabile tra 0 e 0,68 volte l'altezza relativa
Precisione angolare	0°,05
Risoluzione angolare	0°,01
Frequenza di scansione	variabile con l'angolo di scansione: 30 kHz con angolo $\pm 20^\circ$, 50 kHz con angolo $\pm 10^\circ$
Precisione in rollio e beccheggio	0°,04
Precisione in direzione	0°,05
Lunghezza d'onda (λ)	1.047 nm
Range di frequenza	da 100 Hz a 33kHz
Divergenza del raggio a terra	0,30 mrad
Stazione GPS master	Ricevitore geodetico Ashtech Z-Xtreme Z12

Il risultato finale del rilievo è memorizzato in file numerici di diverso formato: il più comune è quello strutturato per stringhe in formato ASCII, una per ogni punto rilevato, con i seguenti otto campi: Est Nord Quota del *first pulse*, Est Nord Quota del *last pulse*, Intensità del *first* e del *last pulse*.

2413492.210	5091234.265	118.219	2413489.831	5091233.014	109.495	5	25
2413492.572	5091234.705	115.860	2413490.490	5091233.612	108.194	6	5
2413495.213	5091236.377	121.380	2413489.160	5091233.205	99.001	2	27
2413497.023	5091237.645	123.336	2413492.438	5091235.249	106.306	3	22
2413497.023	5091237.645	123.336	2413493.542	5091236.117	106.107	3	43
2413496.884	5091238.187	113.759	2413495.204	5091237.313	107.459	10	33
2413496.265	5091238.158	107.110	2413496.268	5091238.160	107.121	75	75
2413497.294	5091238.987	106.640	2413497.309	5091238.995	106.699	96	96
2413498.399	5091239.855	106.460	2413498.410	5091239.861	106.499	90	90
2413499.426	5091240.645	106.531	2413499.414	5091240.639	106.484	16	41

Le "nuvole" di punti 3D sono quindi memorizzate in questi file, detti anche file "grezzi" (*raw*) spesso di dimensioni enormi (anche 100 Mb!). Questo è dunque l'*output* della "scatola nera acquisizione&georeferenziazione laser" che viene consegnato a chi ha commissionato il rilevamento: è necessario ora procedere alle elaborazioni illustrate nel seguito.

3. L'allineamento dei punti

Il rilevamento laser può considerarsi concluso applicando il modello di georeferenziazione diretta [1]; dal punto di vista geometrico, il rilievo è isodeterminato perché le tre coordinate incognite di ogni punto sono determinate mediante tre osservazioni (una distanza e due angoli). Esiste pertanto la possibilità di avere la presenza di errori, anche di tipo sistematico, che possono essere evidenziati nelle zone di sovrapposizione di due scansioni ("strisciate") adiacenti o incrociate.

Per ridurre l'effetto di tali errori, si può procedere al cosiddetto "allineamento" dei punti, che consiste nel *mutuo adattamento delle scansioni minimizzando le discrepanze tra punti comuni a più scansioni*.

Si tratta di una procedura concettualmente analoga al ben noto metodo della "triangolazione aerea a modelli indipendenti", ma con l'importante differenza operativa che in questo caso non esistono punti univocamente omologhi fra le varie strisciate. In letteratura esistono diversi modelli analitici proposti per il rilievo laser aereo che generalmente applicano delle roto-traslazioni infinitesime alle singole scansioni (Kilian *et al.*, 1996; Vosselman e Maas, 2001; Kager e Kraus, 2001). Esistono anche altri modelli pensati invece specificamente per il rilievo laser terrestre (Besl e McKay, 1992; Chen e Medioni, 1992; Crosilla e Beinat, 2003).

Realisticamente, per procedere all'allineamento, viste le difficoltà di natura informatica nella gestione dei file di punti laser, è necessario disporre di *software* dedicati allo scopo, ovvero di procedure specifiche già implementate all'interno di programmi di elaborazione di dati laser, quali ad esempio il modulo dedicato TerraMatch® (Terrasolid) o alcune funzioni del modulo più generale TerraScan® (Terrasolid), quest'ultimo illustrato successivamente.

L'applicazione di vincoli analitici di natura geometrica alle "nuvole" dei punti laser costituisce una strategia generale che sarà seguita anche nelle fasi successive di filtraggio, classificazione e segmentazione. In altri termini, le coordinate 3D di un generico punto fornite dalla [1] risentono delle possibili cause di errore di misura, ma sono fortemente correlate ai valori dei punti limitrofi.

è infatti plausibile ipotizzare che la superficie rilevata abbia una certa continuità e regolarità quindi, ad esempio, punti con coordinate planimetriche pressoché corrispondenti devono avere quote analoghe o diverse ma comunque entro una soglia prefissata: questo criterio può essere sfruttato per l'allineamento, il filtraggio e la classificazione.

Alcuni modelli analitici quali quelli proposti da Filin (2001) e da Burman (2000, 2002) sfruttano una prima ricostruzione "grezza" della superficie definita dalle misure laser: a partire quindi da un DSM grezzo, si procede iterativamente al suo affinamento e raffittimento.

Si possono infine sfruttare ulteriori condizioni analitiche quando per la stessa area esistono già altre informazioni cartografiche numeriche, situazione più o meno verosimile a seconda dei casi. Un DTM ottenuto da una cartografia numerica vettoriale 3D, anche a maglia molto ampia, può risultare di ausilio per irrobustire gli algoritmi di filtraggio e di classificazione. Così come è evidente che un'ortofoto digitale è di straordinario aiuto alla classificazione, alla segmentazione e alla modellazione: il problema aperto è invece l'implementazione di procedure informatiche per sfruttare automaticamente il contributo informativo radiometrico dei punti laser. Si pensi inoltre che produrre una *true* ortofoto è un'opzione peculiare del rilievo laser, realizzabile semplicemente dotando il sistema di una camera digitale, orientandola con gli stessi sensori GPS/INS e proiettando le immagini sul DSM ricavato dagli stessi dati laser.

In conclusione, si può dire che nelle elaborazioni di punti laser è conveniente sfruttare ogni altra informazione geometrica esterna ottenuta con tecniche fotogrammetriche, mediante procedure più o meno ottimali e sofisticate. Va però parimenti ribadito che, anche in presenza di queste condizioni favorevoli, non è corretto affermare che il laser è una tecnologia completamente automatica che sostituisce il rilevamento fotogrammetrico.

4. Il filtraggio dei punti

Il filtraggio rappresenta la prima delle fasi del cosiddetto *post-processing*, ovvero di post elaborazione

del dato grezzo (*raw*) che altrimenti risulterebbe inutilizzabile. Per procedere infatti all'individuazione, ad esempio, delle sovrastrutture manufatte presenti in un'area rilevata, è necessario procedere alla separazione dei punti che appartengono al terreno rispetto a quelli relativi agli oggetti che stanno al di sopra di esso. Ci si riferisce generalmente a tale operazione con il termine di "filtraggio" che è quindi l'operazione di *eliminazione (semi-) automatica dei punti non appartenenti alla superficie del terreno*, ovvero all'individuazione e rimozione di punti corrispondenti a:

- errori grossolani di misura (*outliers*): per qualche errore strumentale possono essere grossolanamente rilevati come "troppo bassi" o "troppo alti";
- edifici, vegetazione, "oggetti piccoli" (automobili, muretti di recinzione), ...

In termini operativi, il filtraggio è quell'operazione che permette la realizzazione del DTM, cioè quella superficie a maglie triangolari irregolari (*Triangulated Irregular Network*, TIN) di Delaunay o a griglia regolare (*grid*) passante per i soli punti "terreno", che si differenzia dal DSM passante invece per "tutti" i punti rilevati.

Esistono in letteratura numerosi algoritmi di filtraggio che si possono raggruppare in due principali categorie: una basata su un approccio matematico di tipo prevalentemente geometrico-locale, l'altra su modelli analitici di natura statistico-globale. Di seguito si riporta, un elenco (certamente incompleto) degli algoritmi maggiormente utilizzati, classificabili nella prima delle due categorie.

- Interpolazione polinomiale robusta ai minimi quadrati (Kraus e Pfeifer, 1997; Pfeifer *et al.*, 1998; Briese e Pfeifer, 2001): si stimano delle superfici medie $S(X,Y)$ rimuovendo la vegetazione e l'edificato dal terreno.
- Funzioni di morfologia matematica (Zhang *et al.*, 2003): sono utilizzate funzioni numeriche locali considerando punti adiacenti (p.e. il gradiente) che estendono un *subset* iniziale *outlier-free* mediante iterazioni successive e tenendo conto di specifici valori di soglia.
- Funzioni di distanza (Vosselman, 2000; Sithole, 2001; Roggero, 2001, 2002): si individuano i punti terreno sulla base del rapporto (pendenza) tra la variazione di quota e la corrispondente distanza fra i punti.
- Funzioni di più criteri geometrici (Axelsson, 1999, 2000): è un'evoluzione dell'algoritmo precedente basato anche su ulteriori criteri di accettazione dei punti terreno ed è illustrato in seguito.
- Funzioni *Splines* (Brovelli *et al.*, 2001, 2003): si impiegano superfici curve a controllo locale, stimate con un metodo generalizzato ai minimi quadrati e regolarizzatore di Tikhonov.
- Segmentazione topologica (Nardinocchi *et al.*, 2003): è un algoritmo di interpolazione su griglia regolare, con segmentazione basata sulle differenze di quota.

In Sithole e Vosselman (2003) è riportato il confronto fra alcuni di questi ed altri algoritmi, realizzato nell'ambito del test "Extracting DEMs from point clouds" promosso dalla Società Internazionale di Fotogrammetria e Telerilevamento (ISPRS). Per tali algoritmi, sono stati esaminati il rendimento in termini computazionali (*run times*), le specifiche funzionalità degli stessi e la loro capacità di produrre in modo efficace il DEM e il DTM. In Tabella 2 sono elencati gli algoritmi confrontati e i giudizi ottenuti.

Tabella 2 - Risultati del test ISPRS "Extracting DEMs from point clouds" (da Sithole e Vosselman, 2003).

Sviluppatori / partecipanti	Denominazione dell'algoritmo
M. Elmquist - Swedish Defence Research Institute (FOI), Stoccolma, Svezia	Active Contours – Elmquist (2001)
G. Sohn - University College London (UCL), Regno Unito	Regularization Method – Sohn e Dowman (2002)
M. Roggero - Politecnico di Torino, Italia	Modified Slope based filter - Roggero (2001, 2002)
M. Brovelli - Politecnico di Milano, Italia	Spline interpolation – Brovelli (2001, 2003)
R. Wack, A. Wimmer - Joanneum Research Institute of Digital Image Processing, Graz, Austria	Hierarchical Modified Block Minimum - Wack e Wimmer (2002)
P. Axelsson – DIGPRO Stoccolma, Svezia	Progressive TIN densification - Axelsson (1999, 2000)
G. Sithole, G. Vosselman – TU Delft, Olanda	Modified Slope based filter - Vosselman (2000), Sithole (2001)
N. Pfeifer, C. Briese – TU Vienna, Austria	Hierarchic robust interpolation - Pfeifer et al. (1998), Briese e Pfeifer (2001)

	Elmqvist	Sohn	Roggero	Brovelli	Wack	Axelsson	Sithole	Pfeifer
Outliers								
High points	G	G	G	G	G	G	G	G
Influenza degli high points	G	G	G	G	G	G	G	G
Low points	G	F	F	G	G	F	F	G
Influenza dei low points	G	G	G	G	G	P	P	G
Complessità degli oggetti								
Oggetti di grandi dimensioni	G	G	G	G	G	G	G	G
Oggetti di piccole dimensioni	G	G	G	G	G	G	G	G
Oggetti complessi	F	F	F	F	F	F	F	F
Oggetti bassi	P	P	G	G	G	F	F	F
Terreno discontinuo	F	F	F	F	F	F	F	F
Oggetti discontinui								
Edifici su superfici inclinate	G	F	F	F	F	G	F	G
Ponti	G	G	G	G	G	F	G	G
Rampe	P	P	P	P	P	F	P	P
Vegetazione								
su superfici orizzontali	G	G	G	G	G	G	G	G
su superfici inclinate	G	G	F	F	F	F	F	G
Bassa vegetazione	G	F	F	F	G	F	F	G
Discontinuità								
Preservation	P	P	P	P	F	F	P	F
Sharp ridges	P	P	P	P	F	P	P	P

G (Good) = Voce filtrata nella maggior parte dei casi (> 90%);

F (Fair) = Voce a volte non filtrata;

P (Poor) = Voce non filtrata il più delle volte.

Il filtraggio con TerraScan

Le elaborazioni numeriche condotte nell'ambito del progetto INTER-REG IIIA sono state svolte con il noto *software* commerciale TerraScan® (Terrasolid, www.terrasolid.fi), che rappresenta uno *standard* di alto livello per la rappresentazione dei dati laser, il trattamento di grosse moli di dati e la molteplicità di procedure disponibili per la classificazione, la segmentazione e la modellazione. Dal punto di vista informatico, tale modulo *software* è un'applicazione sviluppata in linguaggio MDL (*MicroStation Development Language*) eseguibile all'interno dell'ambiente grafico MicroStation® (Bentley) che sfrutta al meglio le notevoli potenzialità di questo sistema CAD.

In TerraScan, la fase di filtraggio è svolta mediante l'utilizzo di diversi comandi "di classificazione" ed è quindi intesa come un caso particolare di questa più ampia fase, illustrata nel capitolo seguente. In riferimento alla definizione precedente, si individuano e rimuovono i punti corrispondenti a:

- errori grossolani di misura (*outliers*) mediante i comandi "Classify low points", "Classify isolated points" e "Classify air points";
- edifici, vegetazione ed "oggetti piccoli" mediante il comando principale "Classify ground" (Figura 10), successivamente raffinato dal comando "Classify below surface".

Si descriverà il solo comando "Classify ground", fondamentale per l'operazione di filtraggio, ovvero di ricerca dei punti appartenenti alla classe "terreno"; non si entra nei dettagli degli altri comandi, tutti comunque basati sul fatto che la presenza di outliers ed errori è segnalata dalla loro "improvvisa" variazione di quota rispetto ai punti dell'intorno.

In "Classify ground" è implementato l'algoritmo di "Densificazione progressiva di TIN" proposto da Axelsson (2000), valutato nel test ISPRS (peraltro nella versione DIGPRO) ed i cui giudizi sono evidenziati in Tabella 2.

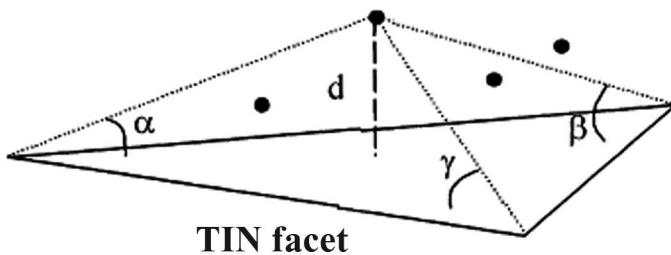
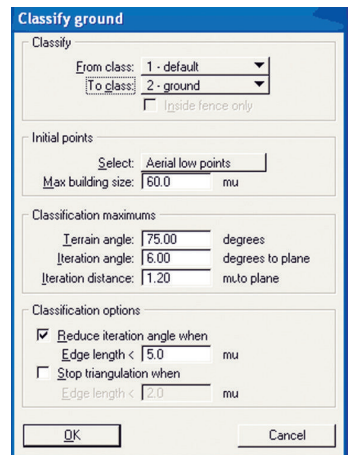


Figura 10 - Algoritmo di filtraggio di TerraScan (densificazione progressiva di TIN, Axelsson, 2000): a sinistra lo schema di una maglia TIN, a destra la finestra di dialogo del corrispondente comando "Classify ground".

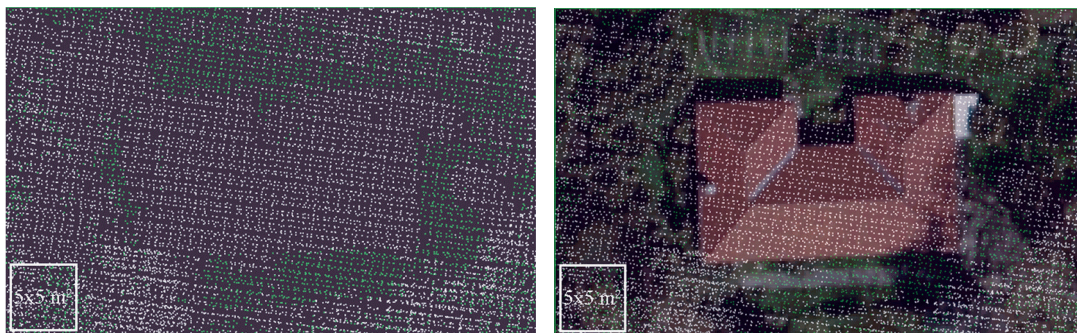


Il comando richiede la definizione di alcuni parametri geometrici di soglia per l'accettazione o il rifiuto dei punti: appare evidente come l'aspetto critico di questo comando e di gran parte di quelli di classificazione è dato proprio dalla scelta opportuna di questi valori, da fissare caso per caso, sulla base di precedenti esperienze in situazioni analoghe.

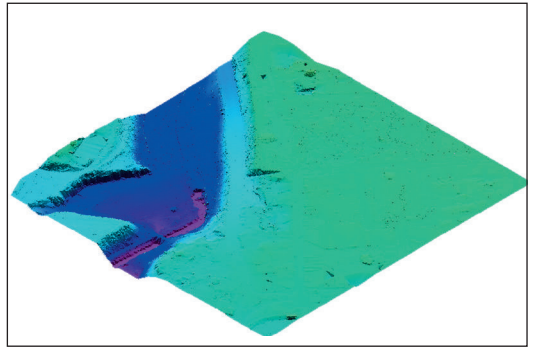
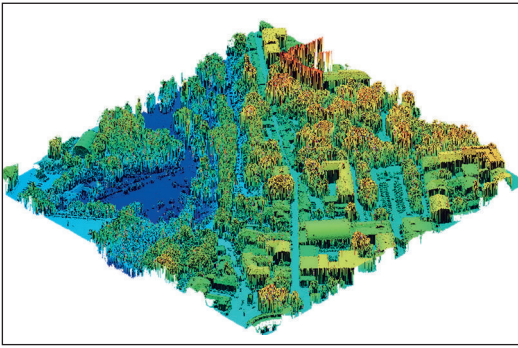
Il primo parametro da fissare adeguatamente è la *Maximum building size*, che corrisponde alla massima distanza a cui possono trovarsi due punti terreno per la presenza di un edificio, ad esempio un grande complesso industriale. L'algoritmo ricerca automaticamente i cosiddetti "punti cardine", ovvero i punti più bassi che andranno a definire una prima superficie del terreno a triangoli molto ampi (vedi Figura 10 a sinistra). Un triangolo della maglia primaria viene densificato aggiungendo quale nuovo vertice un punto ad esso interno se i tre nuovi sotto-triangoli soddisfano i seguenti parametri geometrici: angoli di inclinazione, α , β , γ , dal triangolo iniziale inferiori al valore dell'*Iteration angle* e distanza d inferiore alla *Iteration distance*, entrambi prefissati dall'utente. Questa fase si ripete iterativamente finché l'inclinazione dei triangoli è inferiore al massimo angolo ammissibile per il terreno, definito dal parametro *Terrain angle*.

Il risultato finale ottenuto con questa procedura è generalmente soddisfacente perché il terreno viene individuato con buona affidabilità: a titolo di esempio, si osservi la Figura 11 che raffigura una zona urbana con un edificio al centro, il giardino (terreno) e la vegetazione circostante. I punti laser sono diversamente colorati secondo i risultati di "*Classify ground*": in verde i punti classificati come terreno ed in bianco tutti gli altri. A sinistra è rappresentata la sola nuvola di punti, a destra è visibile anche la *true* ortofoto digitale ad alta risoluzione (1 pixel pari a 20 cm), con la quale risulta coerente l'individuazione del terreno.

Figura 11 - Esempio di filtraggio in una zona urbana: a sinistra in verde i punti classificati come terreno, a destra la sovrapposizione con l'ortofoto.



Sfruttando le funzioni implementate nel modulo TerraModeler® (Terasolid), specificamente dedicato alla realizzazione, *editing* e gestione di modelli digitali, è poi possibile calcolare immediatamente il DTM (Figura 12 a destra) considerando i soli punti terreno. È interessante il confronto visivo con il corrispondente DSM (Figura 12 a sinistra), dal quale si differenzia significativamente per l'assenza (filtraggio) *in primis* dell'edificato e della vegetazione.



Il filtraggio con SFS

Una parte dell'attività di ricerca svolta nell'ambito del progetto INTERREG IIIA ha riguardato la definizione e lo sviluppo di un originale algoritmo di filtraggio di dati laser, caratterizzato da un approccio di tipo statistico-globale alla soluzione del problema. L'algoritmo in questione, denominato SFS (*Spatial Forward Search*, Crosilla, Visintini e Prearo, 2003, 2004a, 2004b), utilizza un particolare modello regressivo spaziale detto SAR (*Simultaneous AutoRegressive*, vedi ad esempio Atkinson e Riani, 2000). Tale approccio permette la stima *simultanea autoregressiva* sia del *trend* della superficie del terreno che dell'eventuale grado di interazione spaziale fra le misure laser. Rimandando ai riferimenti bibliografici per i dettagli analitici, l'equazione di base del modello è:

$$\mathbf{z} - \mathbf{A}\theta = (\mathbf{I} - \rho\mathbf{W})^{-1}\boldsymbol{\varepsilon} \quad [2]$$

dove:

\mathbf{z} vettore $[n \times 1]$ delle quote H_i degli n punti laser;

\mathbf{A} matrice $[n \times r]$ dei coefficienti polinomiali, funzione delle coordinate E_i, N_i , descrittivi il *trend* deterministico della superficie;

$\theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \dots \ \theta_{r-1}]^T$ vettore $[r \times 1]$ contenente gli r parametri incogniti del polinomio;

\mathbf{I} matrice identità $[n \times n]$;

ρ coefficiente dell'interazione spaziale media fra le misure laser;

\mathbf{W} matrice $[n \times n]$ di adiacenza spaziale fra le varie coppie di punti laser;

$\boldsymbol{\varepsilon}$ vettore $[n \times 1]$ dei residui.

La stima $\hat{\theta}$ di massima verosimiglianza dei parametri incogniti contenuti in $\hat{\theta}$ è data da:

$$\hat{\theta} = (\mathbf{A}^T \hat{\Sigma} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \hat{\Sigma} \mathbf{z} \quad [3]$$

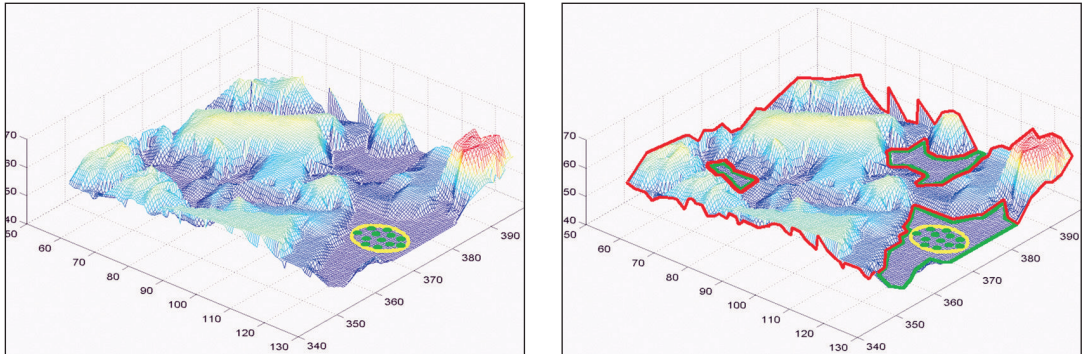
dove la matrice dei pesi $\hat{\Sigma} = (\mathbf{I} - \hat{\rho}\mathbf{W})^T (\mathbf{I} - \hat{\rho}\mathbf{W})$ contiene il coefficiente $\hat{\rho}$ da stimare mediante un processo di massimizzazione numerica.

Il *trend* della superficie del terreno ottenuto dalla [2] è verosimile se e solo se i punti considerati nel processo di stima autoregressiva appartengono al terreno stesso; si tratta di una condizione non soddisfatta

Figura 12: Viste assonometriche di modelli digitali da punti laser sulla città di Gorizia: a sinistra il DSM di una zona, a destra il corrispondente DTM.

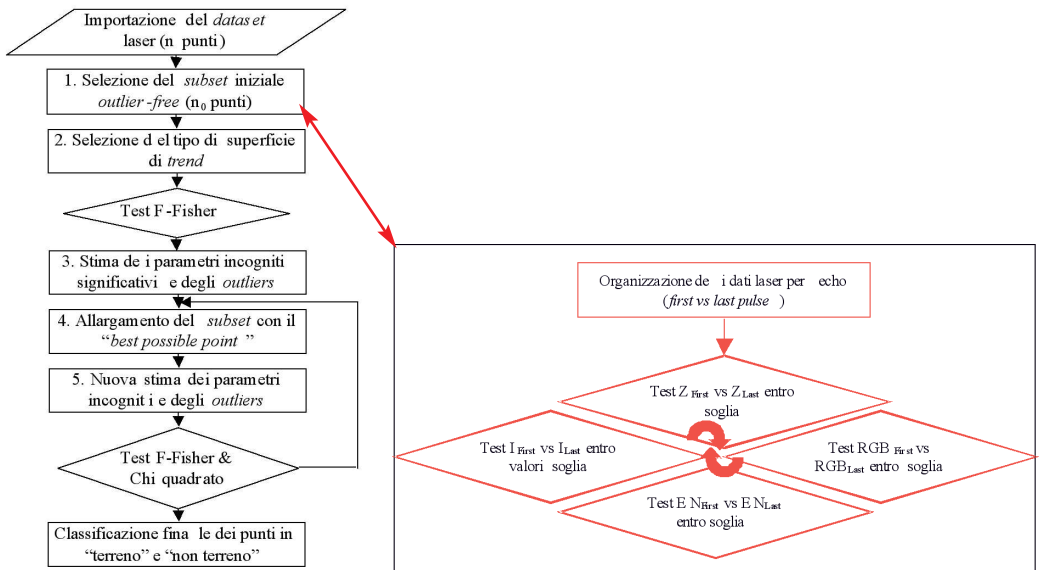
se si considerano tutti i punti laser acquisiti. È allora necessario individuare con certezza un sottoinsieme di punti che sicuramente appartengono al terreno, detto *subset outlier-free*, mediante il quale stimare correttamente la *trend* (Figura 13 a sinistra). Si procede quindi al suo allargamento in modo iterativo applicando un particolare metodo robusto detto *Block Forward Search* (Cerioli e Riani, 2003), fino ad individuare tutti e soli i punti appartenenti alla *trend*, cioè al terreno (in verde in Figura 13 a destra, dove in rosso sono invece evidenziate le aree "non terreno").

Figura 13 - Esempio di DSM di punti laser filtrati con SFS: a sinistra il subset iniziale outlier-free, a destra in verde le aree individuate come terreno, in rosso le aree classificate come "non terreno".



In Figura 14 a sinistra è illustrato il diagramma di flusso dell'algoritmo, implementato in ambiente Matlab® (MathWorks); successivamente vengono descritte sinteticamente le fasi principali di elaborazione.

Figura 14 - a sinistra il diagramma di flusso dell'algoritmo SFS, a destra i criteri per la selezione del subset iniziale outlier-free (fase 1).



1. Selezione del subset iniziale outlier-free

Dopo aver importato i punti laser, fase di input del processo, il primo passo è la selezione del *subset* di partenza, di numerosità $n_0 \ll n$. Tale operazione avviene in modo semi-automatico, ovvero indicando una zona candidata mediante opportune visualizzazioni grafiche, ma lasciando comunque all'utente la selezione dei punti mediante una *fence* di forma qualsiasi.

In Figura 14 a destra sono indicati i quattro criteri implementati da SFS a tal fine, considerando di avere a disposizione i dati nel formato *raw* prima indicato (valori di Est, Nord, Quota, Intensità per *first* e *last pulse*) ed eventualmente anche i corrispondenti valori radiometrici dei colori RGB opportunamente acquisiti da un'ortofoto digitale.

Grazie a queste informazioni geometriche, si eseguono allora per tutte le coppie di punti *first* e *last* una serie di test sia sul loro scostamento altimetrico che su quello planimetrico. Se tali scostamenti sono inferiori a una certa soglia, realisticamente i punti non appartengono alla vegetazione ma a superfici più regolari quali terreno, strade, pavimentazioni, tetti.

Disponendo dei dati radiometrici si eseguono analoghi test per quelle coppie di punti *first* e *last* che soddisfano i precedenti test geometrici: se i valori di intensità laser, dei colori RGB e le mutue differenze fra *first* e *last* (sia d'intensità che di colore) rientrano entro determinate soglie, allora a maggior ragione i punti appartengono a superfici regolari.

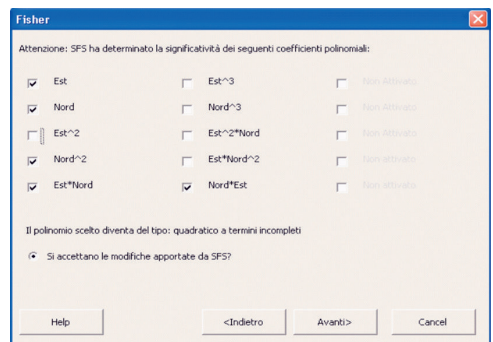
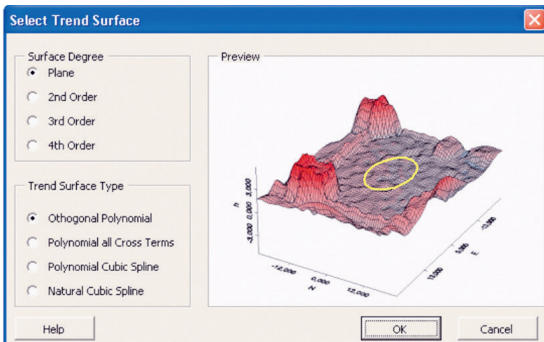
Si tratta di criteri geometrici e radiometrici largamente utilizzati nella fase di classificazione e che verranno ripresi nel capitolo successivo, nel quale si illustreranno in particolare alcuni problemi operativi legati all'individuazione delle soglie radiometriche di accettazione/rifiuto.

2. Selezione del tipo di superficie di trend

La scelta del polinomio di primo tentativo è lasciata all'utente (Figura 15 a sinistra): è conveniente scegliere un polinomio comunque ridondante, ad esempio di tipo quadratico anche per terreni pianeggianti.

1. Mediante la [3] si stimano i parametri incogniti del *trend* superficiale a partire dalle grandezze **A** e **b** relative al solo *subset outlier-free*.

Figura 15 - Dialog box di SFS: a sinistra la scelta del tipo di superficie di primo tentativo, a destra il risultato del test F di Fisher sul grado di significatività dei diversi coefficienti polinomiali.



Ai parametri di $\hat{\theta}$ così stimati si applica il test F di Fisher, in modo da verificare se tutti i parametri sono significativi per ricostruire le quote H_i o se qualcuno di essi può essere trascurato. È così possibile ottimizzare il polinomio (Figura 15), in funzione dei soli parametri effettivamente necessari a descrivere la superficie del terreno.

3. Stima dei parametri incogniti significativi e degli outliers

Fissato così il grado del polinomio e operando sul solo *subset outlier-free*, si stimano nuovamente mediante la [3] i parametri incogniti, considerando una matrice \mathbf{A} ridotta alle sole colonne corrispondenti ai parametri diversi da zero.

Applicando la tecnica *Block Forward Search*, SFS procede in maniera iterativa ad allargare il *subset* introducendo i punti che meglio si adattano al *trend* prefissato.

4. Allargamento del subset

Si calcolano i residui standardizzati di tutte le quote laser H_i rispetto al *trend* stimato per il solo *subset outlier free* e si individua il punto che presenta il minor residuo standardizzato in valore assoluto. Questo punto è detto “*best possible point*” poiché presenta la miglior congruenza con la superficie del *trend*, sebbene non appartenga al *subset* iniziale. Tale punto viene quindi aggiunto al *subset* che così aumenta la numerosità di una unità (*Unitary Forward Search*, UFS).

5. Nuova stima dei parametri incogniti e degli outliers.

Si procede alla stima mediante la [3] dei parametri sul *subset* allargato, al calcolo dei residui standardizzati su tutto il *dataset* e all'individuazione di un nuovo *best possible point*.

Le fasi 4. e 5. sono ripetute iterativamente, introducendo ogni volta nel *subset* il punto di miglior adattamento al *trend*: questo assicura che gli *outliers* entreranno per ultimi nel processo e risultano pertanto così facilmente identificabili.

Le iterazioni proseguono finché un test Chi-quadro sulla variazione della varianza $\hat{\sigma}^2$ e un test F di Fisher

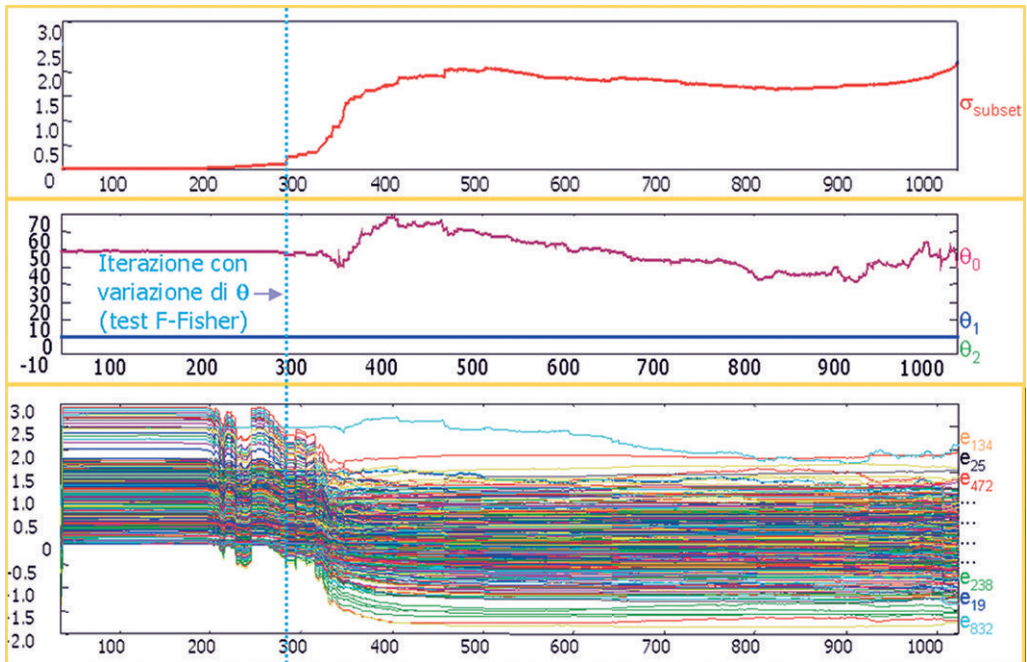
sulla variazione di $\hat{\theta}$ rispetto ai valori iniziali non rivelano che il *best possible point* è in realtà un *outlier*. Infatti, come noto, la presenza di *outliers* fra le osservazioni porta ad una deviazione nelle stime $\hat{\sigma}^2$ e $\hat{\theta}$. Si osservi infatti nei diagrammi di SFS riportati in figura 16, come i valori di $\hat{\sigma}_{dataset}$ in rosso e di θ_0 in viola siano stabili fino all'iterazione evidenziata, dopo di che sono caratterizzati da una notevole variabilità, fornendo quindi valori di poco interesse pratico. Si noti sempre in figura 16, la particolarità dell'andamento dei residui standardizzati: inizialmente la maggior parte dei punti laser presentano residui positivi perché “tutti” i punti stanno al di sopra del terreno. Dopo una fase di iterazioni di assestamento (nell'esempio, iterazioni da 200 a 300) per le quali vengono introdotti punti laser ancora appartenenti al terreno ma più rumorosi, si ha l'introduzione dei primi *outliers*. Continuando ulteriormente ad aggiungere punti al *subset*, oltre che a pregiudicare le stime $\hat{\sigma}_{dataset}$ e θ_0 , i residui vengono stimati rispetto ad una superficie media di quota maggiore: compaiono così dei residui negativi dovuti proprio ai punti terreno.

6. Classificazione finale dei punti in “terreno” e “non terreno”

Sono classificati come “terreno” i punti del *subset* iniziale e tutti quelli introdotti fino a che i test di Fischer e Chi-quadro risultano soddisfatti; tutti gli altri punti sono classificati come *outliers*, quindi come “non terreno”.

Va infine evidenziato come la stima $\hat{\theta}$ e la classificazione dei punti risulterebbero non affidabili se venissero effettuate considerando l'intero *dataset*. Ciò si evidenzia osservando in Figura 16 i valori delle grandezze in corrispondenza dell'ascissa finale, che hanno il significato di semplici valori medi dell'intero *dataset*.

Una volta realizzato il filtraggio/classificazione dei punti terreno, l'algoritmo SFS può essere applicato per reiterare tale processo su tutte le zone “non terreno”, cioè per individuare gli oggetti che sono modellizzabili mediante un altro *trend* superficiale. Ciò è stato applicato per la ricerca delle superfici dei tetti degli edifici, come verrà illustrato in seguito nel capitolo relativo alla segmentazione.



Confronto tra i filtraggi eseguiti con SFS e con TerraScan

Data l'enorme mole di dati a disposizione per la città di Gorizia, e vista l'impossibilità di procedere ad una elaborazione complessiva da parte dell'algorithm SFS, si è provveduto alla suddivisione dei dati in numerose sotto-aree, in modo da limitare la spesa computazionale della classificazione. I dataset così elaborati erano costituiti mediamente da 15.000 punti non grigliati, acquisiti ad una densità media di 1 p.ti/mq in zone prevalentemente pianeggianti.

Il dataset individuato per la verifica del corretto funzionamento dell'algorithm è quella relativa a Piazza della Vittoria, sita nel centro cittadino e caratterizzata principalmente da un andamento praticamente pianeggiante (vedi Figura 18 a sinistra) e circondata da varie tipologie di edifici, nonché da alcune piante ad alto fusto ed un cospicuo numero di autoveicoli parcheggiati. All'interno della suddetta piazza tuttavia non risultano presenti di linee tecnologiche di tipo sospeso.

I 14.953 punti laser sono stati elaborati e classificati sia con SFS che con TerraScan (comandi "Classify low points", "Classify isolated points", "Classify air points", "Classify ground" e "Classify below surface"). In Figura 17 sono riportati i risultati ottenuti nelle due diverse elaborazioni: per 679 punti, cioè il 4,5% dei punti totali, si è riscontrata una classificazione inversa: per SFS sono "punti terreno" mentre per TerraScan sono "punti non terreno".

Le differenze fra le due classificazioni riguardano prevalentemente le zone destinate a parcheggio; ciò è principalmente dovuto al fatto che

Figura 16 - Diagrammi di SFS dell'andamento di alcune grandezze durante le iterazioni. In alto σ_{subset} in rosso; al centro θ_0 in viola, θ_1 in blu e θ_2 in verde; in basso i residui standardizzati dell'intero dataset.

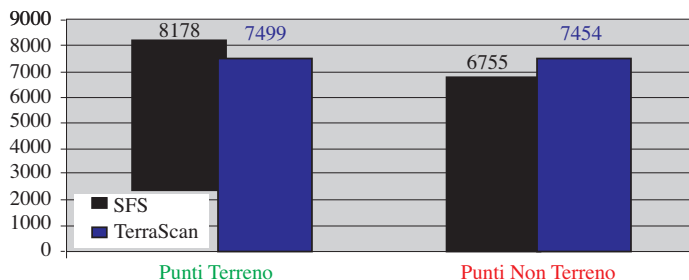


Figura 17 - Classificazione SFS vs classificazione TerraScan dei punti nell'area di Piazza della Vittoria in Gorizia.

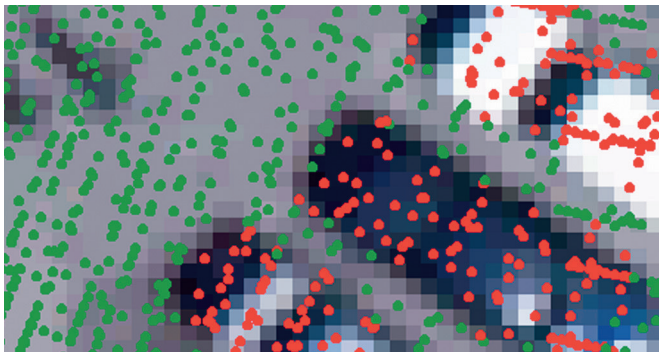
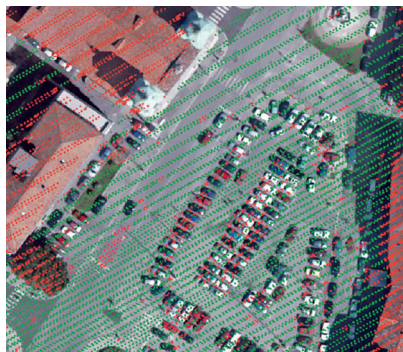
Figura 18 - Risultato della classificazione con SFS sovrapposto all'ortofoto digitale: a sinistra i punti a bassa densità (ortofoto non contemporanea), a destra un particolare con i punti ad alta densità (ortofoto contemporanea 1 pixel pari a 20 cm).

per SFS l'accettazione dei punti è demandata, come detto, ad un test statistico basato sulla significatività della variazione dei parametri del *trend*: la scarsa densità di campionamento e la contenuta differenza di quota degli autoveicoli rispetto al terreno, non danno luogo ad una significativa variazione dei suddetti parametri.

Inoltre è interessante osservare come vi sia una piccola ma pur significativa differenza nella natura statistica dell'errore che caratterizza i due *software*: se infatti l'algoritmo SFS tende ad "accettare falsi punti terreno" (errore statistico di II° tipo), l'opposto accade con TerraScan, che tende a volte a "rifiutare veri punti terreno" (errore statistico del I° tipo).

Come valutazione generale dei risultati conseguiti con SFS, si osservi la Figura 18 a sinistra nella quale sull'ortofoto sono colorati in verde i punti laser classificati come terreno ed in rosso gli altri. Si nota un'ottima coerenza per quanto riguarda le aiuole, gli alberi e gli edifici, mentre un discorso a parte meritano gli autoveicoli. I punti laser sono stati acquisiti nel mese di novembre 2003 mentre l'immagine è stata ripresa nel mese di aprile 2004: la zona centrale di parcheggio si può immaginare occupata in modo analogo, ma nulla si può dire sulle auto in movimento. Si noti l'area rettangolare allungata di punti rossi in corrispondenza della segnaletica orizzontale di stop (in basso al centro): realisticamente si tratta di un autobus o camion evidenziato da SFS come "non terreno".

La Figura 18 a destra mostra invece l'elaborazione con SFS dei punti laser ad alta densità di una zona centrale della piazza e per i quali l'ortofoto è invece contemporanea: si osservi come le autovetture sono state correttamente filtrate come "non terreno".



5. La classificazione dei punti

Il filtraggio del terreno ha permesso di isolare regioni di punti che appartengono ad oggetti che stanno al di sopra del terreno stesso e che per questo motivo sono stati momentaneamente indicati come punti "Non terreno". Si procede allora alla "classificazione", cioè all'*assegnazione (semi-) automatica dei punti a classi specifiche, in base a criteri di tipo geometrico e/o radiometrico*. Questa operazione consente, ad esempio, di identificare regioni di punti-edificio distinguendole da quelle di punti che appartengono alla vegetazione o ad oggetti di piccole dimensioni.

I metodi di classificazione proposti in letteratura sono molteplici perché molteplici sono le problematiche che emergono dalla definizione di criteri efficaci a descrivere le peculiarità dell'oggetto che si vuole individuare nella nube di punti che non appartengono al terreno.

Tra i diversi metodi, si ricorda quello di Rottensteiner e Briese (2002) che attua una classificazione dei punti non appartenenti al terreno analizzando la rugosità, indicata da forti variazioni locali della direzione della normale alla superficie, allo scopo di discriminare vegetazione ed edifici. Tale criterio si dimostra particolarmente efficace nel classificare regioni isolate di vegetazione, ma non altrettanto nell'individuare aree di vegetazione che siano connesse ad edifici. Per ovviare a tale problema, gli stessi autori applicano, all'ipotetica regione edificio, un filtro detto *morphological opening filter* (su dati grigliati) in modo tale da cancellare piccoli oggetti allungati, come i recinti, e da separare regioni collegate solamente da una linea sottile di celle. In questo modo si può isolare l'edificio rispetto ad eventuali oggetti ad esso addossati.

L'approccio suggerito da Filin (2002) si propone di estrarre *features* che permettano l'individuazione di oggetti 3D; tale metodo consiste nella selezione di regioni omogenee sulla base dell'analisi di parametri caratteristici, quali la curvatura e il gradiente delle superfici, classificando con tecniche di *clustering* i punti in alberi, bassa vegetazione, regioni piane, regioni a debole curvatura.

Anche Voegtler e Steinle (2003) applicano un approccio parametrico per attuare la classificazione,

basato su analisi geometriche e radiometriche già viste in precedenza, considerando in sequenza:

1. il gradiente di quota sui contorni delle regioni "Non terreno";
2. la differenza di valore radiometrico tra *first* e *last pulse*;
3. la forma della regione.

In via preliminare, in base ai valori del gradiente della quota lungo il contorno delle regioni classificate come "non terreno", si distinguono le "regioni edificio" dalle "regioni vegetazione". Successivamente, ben sapendo che il raggio laser può attraversare il fogliame e raggiungere il terreno, la differenza di quota tra *first* e *last pulse* permette di discernere in modo più affidabile gli edifici dalla vegetazione. È possibile infatti affermare che regioni di punti, per i quali tale differenza è maggiore di una certa soglia predefinita, saranno con ogni probabilità ricoperte da vegetazione. Infine, viene considerata la forma della regione di analisi: nel caso di un edificio, la forma deve essere più regolare rispetto a quella di regioni occupate dalla vegetazione.

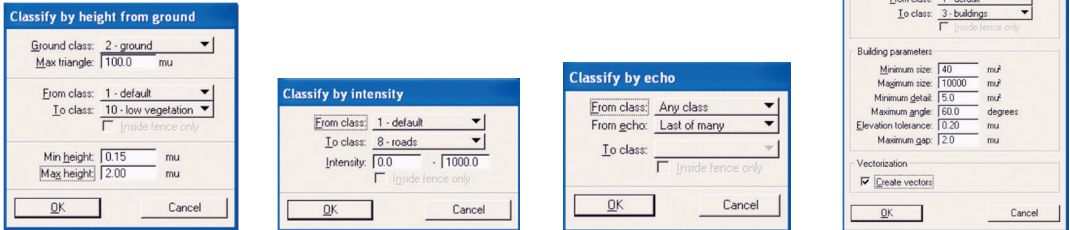
La classificazione con TerraScan

La classificazione per mezzo del software TerraScan è anch'essa basata su un approccio di tipo parametrico e si sviluppa secondo un'ordinata sequenza di fasi. A partire da una preliminare classificazione di tutti i punti "non terreno" in punti "vegetazione", si procede ad una serie di "filtraggi del filtrato", mediante appositi criteri di classificazione/filtraggio che permettono di affinare via via i risultati intermedi con sempre miglior dettaglio (vedi Figure 19).

La strategia seguita per classificare i punti laser acquisiti su zone urbanizzate è la seguente.

1. Classificazione per altezza dal terreno (comando "*Classify by height from the ground*").

Si classificano i punti come appartenenti alla classe "*low vegetation*" se hanno altezze comprese tra 0,15 m e 1 m, alla classe "*medium vegetation*" se comprese tra 1,01 m e 3 m ed infine a quella "*high vegetation*" tra 3,01 m a 100 m. All'interno della classe "*medium vegetation*" sarà possibile individuare successivamente oggetti quali muretti di recinzione, automobili, fontane e arredo urbano in generale. Nella classe "*high vegeta-*



tion” si potranno invece trovare gli edifici e oggetti di dimensioni notevoli: il passo successivo è quindi l’applicazione di altri comandi di classificazione su questi punti così “pre-classificati” allo scopo primario di individuare fra di essi gli edifici.

2. Classificazione per intensità (comando “Classify by intensity”)

Il valore dell’intensità della risposta radiometrica può essere applicato nel discernere la vegetazione rispetto ad altri oggetti, poiché essa generalmente ha una riflettività molto elevata. Ciò nonostante, spesso è molto arduo riuscire a definire un intervallo di valori per la classificazione, in quanto la riflettività dipende, a parità di strumentazione impiegata, non solo dal tipo di materiale colpito ma anche dalle condizioni atmosferiche e da altri fattori variabili.

3. Classificazione per numero di risposte (comando “Classify by echo”)

Se un punto ha un solo eco di ritorno (*only echo*), ovvero la differenza tra i diversi *pulse* è trascurabile, realisticamente il raggio sarà stato riflesso da una superficie omogenea e liscia (tetto) piuttosto che dalla vegetazione. Per contro, se per un punto l’eco è multiplo (detto anche “primo di molti”, *first of many*), allora saranno maggiori le probabilità che esso sia relativo alla vegetazione piuttosto che ad un tetto. Naturalmente questa modalità di classificazione è realizzabile soltanto con sistemi laser in grado di memorizzare un numero elevato di impulsi e non solo il *first* e il *last*.

4. Classificazione degli edifici (comando “Classify buildings”)

Una volta applicati i metodi precedenti come forma preliminare di classificazione, con questo comando (dedicato espressamente allo scopo) si individuano definitivamente gli edifici fra i punti laser, sfruttando criteri di tipo geometrico. Vanno opportunamente fissati i seguenti parametri geometrici di soglia:

- *Minimum size*: area del più piccolo edificio da individuare;
- *Maximum size*: area del più grande edificio da individuare;
- *Minimum detail*: minimo dettaglio in termini di area da distinguere nella classificazione;
- *Maximum angle*: massima inclinazione ammissibile delle falde del tetto;
- *Elevation tolerance*: tolleranza in quota ammissibile;
- *Maximum gap*: massima distanza fra due punti rilevati adiacenti e

Figura 19 - Comandi di classificazione di TerraScan: nell’ordine per altezza dal terreno, per intensità, per numero di risposte, degli edifici.

appartenenti ad una stessa copertura; il suo valore deve essere comunque minore della distanza minima fra due edifici adiacenti.

Quindi, i punti della classe “*high vegetation*” che si trovino all’interno di una regione omogenea di dimensioni limitate e che rispettino i parametri di inclinazione, tolleranza e distanza imposti, sono classificati e spostati nella classe “edificio”. I risultati che si ottengono sono generalmente soddisfacenti, dal momento che i punti laser relativi ad un edificio presentano una distribuzione spaziale in grado di definirlo univocamente; il problema è piuttosto stabilire i valori dei parametri adatti ad esso. Ciascun edificio presenta infatti proprie caratteristiche tipologiche e solo una conoscenza approfondita dell’edificato consente di fissare dei valori ottimali dei parametri in gioco per ricavare così un’affidabile classificazione degli stessi. La presenza poi di elementi sovrapposti al tetto (camini, abbaini, antenne), che in un rilievo ad alta densità di campionamento possono essere rilevati anche nel dettaglio, può produrre errori nella classificazione e quindi nella successiva fase di modellizzazione. Viceversa, altre difficoltà si incontrano quando si hanno dati laser a bassa densità che non permettono di individuare in modo preciso i contorni degli edifici. Infine anche la tipologia edilizia e l’assetto urbanistico dell’area che si sta analizzando possono indurre ulteriori problemi: in un’area densamente edificata, tipica dei centri storici italiani, gli edifici sono addossati gli uni agli altri e talvolta non è possibile distinguere il corpo di uno da quello adiacente. Ciò comporta non poche difficoltà dal momento che per classificare un edificio, e riuscire poi successivamente a modellizzarlo, è necessario individuare la sua impronta sul terreno o comunque definire una *fence* che contemporaneamente contenga punti dell’ipotetico edificio e i punti del terreno su cui esso poggia.

Oltre alla mera classificazione, il comando “*Classify buildings*” permette di vettorializzare l’edificio, ovvero di identificare i vettori (polilinee tridimensionali) che uniscono i punti di contorno della regione di punti classificati in tal modo, evidenziando quindi gli spigoli dell’edificio stesso. Si

effettua così una prima approssimativa segmentazione della regione di punti edificio e si compie un primo passo verso la modellizzazione dell’edificato.

Vista la complessità delle procedure di classificazione è sempre necessario effettuare un controllo di qualità dei risultati delle regioni di punti che sono stati via via classificati. È evidente che in ogni classificazione eseguita si può incorrere in errori statistici del I tipo (rifiuto di punti effettivamente appartenenti a quella classe) e di II tipo (accettazione di punti appartenenti ad un’altra classe). Ciò può essere evidenziato in TerraScan in maniera “visiva”, osservando la coerenza dei punti colorati secondo le diverse classi grazie a viste diverse e sezioni e profili agevolmente definite dall’utente: individuati così i punti con classificazioni grossolanamente errate, gli stessi vengono corretti manualmente, assegnandoli alla classe più verosimile mediante il comando “*Assign Point Class*”.

La Figura 20 raffigura la stessa zona vista in precedenza con i punti diversamente colorati sulla base della classificazione finale ottenuta: i risultati sono in buon accordo con l’ortofoto sovrapposta.

Una volta individuata la posizione degli edifici, con TerraModeler si è realizzato il DEM, che qui si intende come quella superficie ottenuta a partire dai soli punti terreno ed edificio, cioè le “elevazioni” artificiali e quelle naturali. In Figura 21 a sinistra è ripreso il precedente DTM, mentre a destra è rappresentato il DEM che permette di evidenziare l’edificato: si noti nella zona centrale, parallela al fiume Isonzo, una serie di “piccoli edifici” costituiti dalle baracche e dalle strutture temporanee del mercato settimanale.

Dalla differenza fra il DEM e il DTM si può calcolare in modo automatico il volume complessivo degli edifici, valore interessante per analisi volumetriche a scopi urbanistici. Tale differenza pur calcolabile anche per zone più limitate, ad esempio un isolato, è tuttavia un’informazione non strutturata e difficilmente utilizzabile in un GIS. È necessario procedere ulteriormente nelle elaborazioni dei dati laser, fino a realizzare un vero e proprio modello 3D vettoriale di ogni singolo edificio.

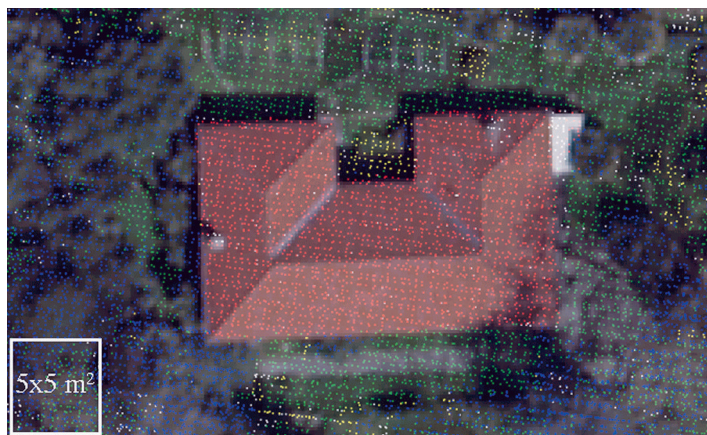
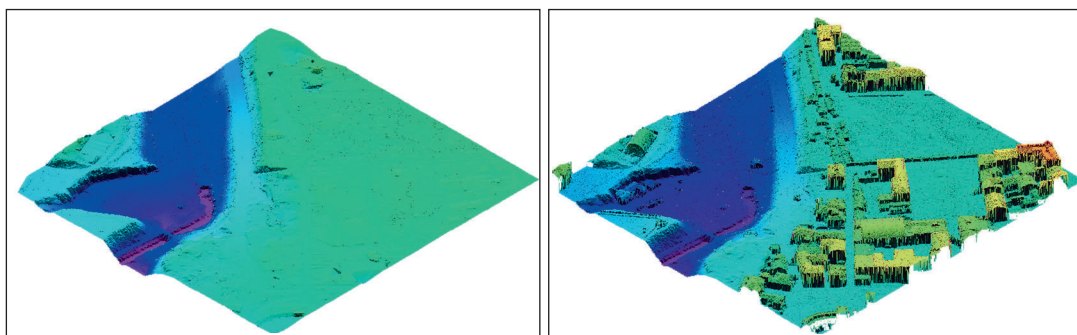


Figura 20 - Classificazione completa ed ortofoto dell'area della Figura 9: in verde i punti terreno, in giallo i punti media vegetazione, in blu i punti alta vegetazione, in rosso i punti edificio.

Figura 21 - Il precedente DTM di parte della città di Gorizia, a destra il DEM corrispondente alla stessa zona.



6. La segmentazione dei punti "edificio"

Fase successiva alla classificazione e precedente a quella di modellazione di un generico oggetto è quella di "segmentazione", che consiste nella *suddivisione di un'area classificata in sotto-aree elementari omogenee rispetto ad un dato criterio, con creazione del contorno delle stesse*.

La segmentazione è un'operazione che per molti aspetti dipende dalla classificazione ma che contemporaneamente opera filtrando ulteriormente i punti classificati. Classificazione e segmentazione sono cioè operazioni che non possono essere separate ma che procedono parallelamente nell'analisi dei punti che appartengono ad un dato oggetto. Per molti autori (Roggero, 2002; Nardinocchi *et al.*, 2003) la segmentazione di un oggetto non è altro che una più raffinata fase di classificazione, per altri (Jacobsen e Lohman, 2003) è addirittura una tecnica di filtraggio.

Per ciascuna regione connessa di punti in qualunque modo classificati, è necessario comunque definire un criterio di omogeneità per procedere alla segmentazione e tale criterio dipende dal tipo di oggetto da modellare: si seguiranno approcci completamente diversi qualora si considerino alberi piuttosto che strade ovvero edifici. In letteratura esi-

stono ad esempio degli algoritmi particolarmente interessanti (Vosselman, 2003; Andersen *et al.*, 2002) per ricostruire tridimensionalmente la forma degli alberi; in questo articolo ci si soffermerà soltanto sulla segmentazione e modellazione degli edifici.

Nel caso specifico, il criterio di omogeneità generalmente è l'appartenenza dei punti-edificio ad un piano di falda del tetto, appartenenza verificata in base ad opportuni criteri di carattere geometrico. Le fasi della segmentazione dei tetti sono allora le seguenti:

1. Localizzazione approssimativa degli edifici

Considerando un processo completo di elaborazione di dati laser, tale localizzazione è ovviamente fornita dalla fase di classificazione. Tuttavia, si potrebbe anche partire direttamente dai dati grezzi e procedere all'individuazione degli edifici sulla base di altri supporti informativi disponibili quali un ortofoto, una cartografia numerica o un GIS.

2. Individuazione delle singole falde del tetto

Dato il criterio di omogeneità, la nuvola di punti "edificio" è suddivisa nelle singole superfici elementari ed omogenee che lo compongono. Nel caso più semplice e più largamente applicato, tale superficie primitiva è un piano, quindi proprio ognuna delle falde che compongono un tetto: le stesse vengono così individuate mediante un qualche metodo di interpolazione spaziale dei punti laser. È evidente che per coperture più complesse, curve o a cupola, questo criterio non può essere applicato.

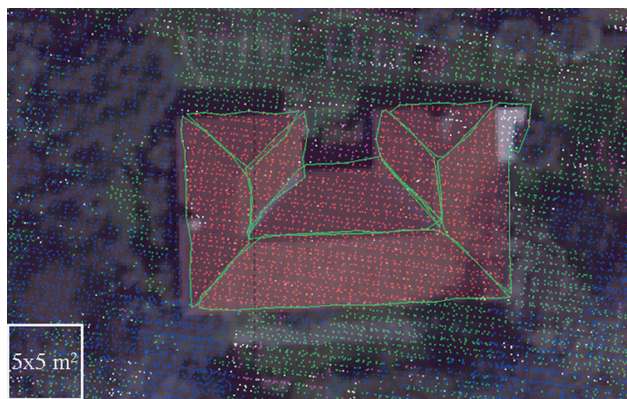
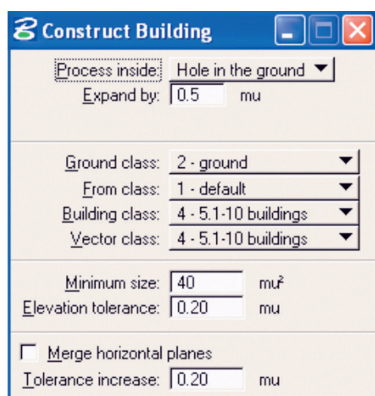
3. Estrazione dei contorni delle falde e dell'edificio.

Così segmentata la nuvola in sotto-nuvole, l'individuazione del loro contorno è un'operazione molto semplice ed univoca che richiede l'individuazione, mediante analisi topologiche di connessione, dei punti laser di confine alle regioni ottenute e la successiva creazione di una polilinea 3D chiusa che li unisca ordinatamente.

La segmentazione con TerraScan®

In TerraScan la segmentazione è ottenuta mediante il comando "*Construct Building*" che individua automaticamente i piani delle falde componenti la copertura di un generico edificio. Il criterio di omogeneità è quindi l'appartenenza di un punto edificio al piano di una falda del tetto. L'appartenenza viene stabilita in base ad un cosiddetto "gradiente di posizione" che si calcola per ogni punto-edificio e permette di individuare insiemi connessi di punti appartenenti a diverse falde. Il comando richiede la denominazione delle classi interessate alla segmentazione (vedi Figura 22, a sinistra) e la definizione di parametri di soglia quali la minima dimensione della falda, la tolleranza in quota dei punti rispetto al piano-falda, legata alla possibilità o meno di fondere assieme eventuali piani orizzontali adiacenti.

All'utente viene richiesto quindi di selezionare l'impronta dell'edificio sul terreno (*Hole in the ground*), ed il comando procede alla stima ai minimi quadrati dell'equazione degli n piani-falda componenti la copertura; si



noti che il numero n non è imposto all'utente ma è conseguente alla distribuzione spaziale dei punti ed ai parametri di soglia imposti. Le singole zone di punti-falda così ottenute sono delimitate da polilinee 3D chiuse (Figura 22, a destra) e ciò è particolarmente significativo dal punto di vista concettuale: alla fine della segmentazione compare quindi l' "oggetto edificio" in luogo della nuvola di "punti edificio".

Figura 22 - a sinistra Comando "Construct Building", a destra il risultato della sua applicazione: in verde chiaro i vettori che definiscono i contorni approssimativi delle falde.

La segmentazione con SFS

è stata recentemente sviluppata una variante dell'algoritmo SFS per l'individuazione automatica dei tetti dell'edificato urbano. Si è operato come segue:

1. Fra i punti classificati "non terreno" per SFS, si sono analizzati quelli relativi ad alcuni edifici;
2. Preso un sottoinsieme *outlier-free* su una falda, l'algoritmo cerca tutti e soli i punti appartenenti ad una superficie con *trend* di tipo piano (inclinato) quale è una falda.

Per individuazione delle superfici dei tetti, si devono quindi identificare i punti appartenenti a ciascuna delle varie falde piane e ripetere il procedimento per tutte le altre: per ciascuna di esse, gli *outliers* sono i punti che non vi appartengono (camini, altre falde, alberi, terreno, ...) oltre che i punti relativi alle altre falde (vedi Figura 23).

La segmentazione dei punti laser del tetto è quindi ottenuta con SFS in maniera indiretta, vettorializzando le aree che contornano i singoli piani falda. L'utente definisce agevolmente mediante la *fence* poligonale un *subset* iniziale di forma qualsiasi, sufficientemente grande e non troppo dissimile dall'intera falda. L'assenza di *outliers* per un'area così estesa è garantita dal controllo che nessun punto abbia un residuo superiore a ± 10 cm. Con questi dati di partenza, il numero di iterazioni necessarie viene significativamente ridotto e l'algoritmo, una volta accertata la presenza dei primi *outliers*, termina le iterazioni.

In Figura 24 si illustrano i risultati dell'applicazione di SFS al tetto dello stesso edificio a otto falde di Figura 22.

Da un confronto visivo fra la segmentazione con SFS e quella con Ter-

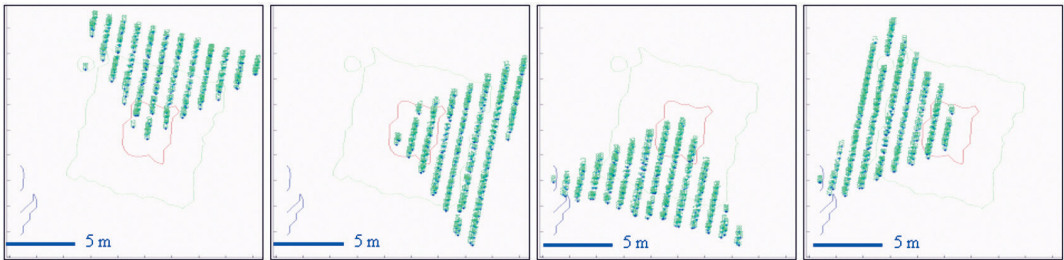


Figura 23 - Individuazione con SFS delle quattro falde del tetto di un edificio (punti colorati in verde).

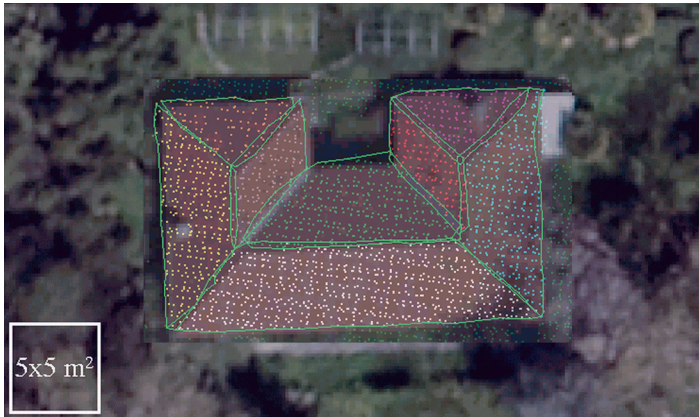


Figura 24 - Risultato della segmentazione con SFS (cfr. con figura 22): in verde chiaro i vettori che definiscono i contorni approssimativi delle falde.

raScan, si nota come con SFS le falde ottenute hanno un'estensione maggiore, seppur di poco, di quelle ricavate con TerraScan. Infatti in corrispondenza delle linee di colmo, di displuvio e di compluvio, in Figura 24 si notano delle sovrapposizioni tra le falde, mentre in Figura 22 si hanno delle lacune. Ciò conferma il comportamento già evidenziato in precedenza per la classificazione dei punti terreno: la tendenza di SFS ad accettare punti non appartenenti alla superficie (falda) e, viceversa, quella di TerraScan di rifiutare punti appartenenti alla superficie. In entrambi i casi la segmentazione va comunque regolarizzata mediante una serie di comandi di *editing* assistito, come verrà illustrata al capitolo seguente: si può concludere quindi che i risultati di SFS sono analoghi a quelli di TerraScan.

7. La modellazione 3D degli edifici

La modellazione solida o ricostruzione tridimensionale è l'ultima fase dell'elaborazione dei dati laser e concerne (nel caso specifico degli edifici) *la stima della forma, della posizione e dell'orientamento degli edifici applicando metodi basati su modelli di tipo parametrico o generico.*

Modelli parametrici

Nei modelli parametrici vengono stabilite a priori le tipologie di edificio da individuare, in genere a pianta rettangolare e con tetto a 2 falde, a 4 falde, ecc.. Tali tipologie sono descritte da parametri geometrici che

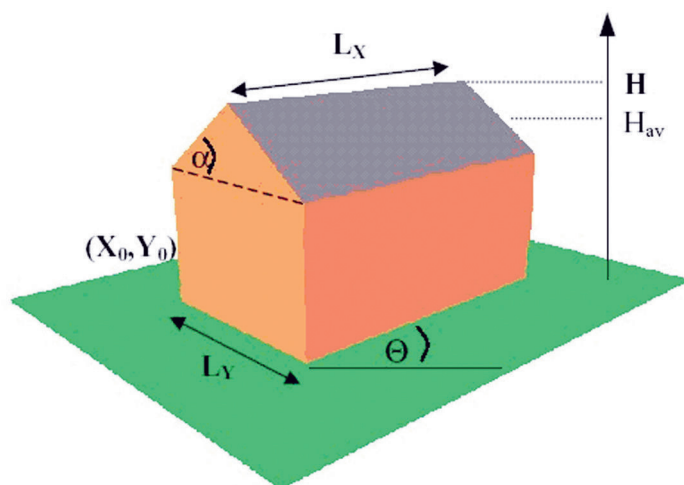


Figura 25 - Modello parametrico di edificio a due falde simmetriche, definito da 7 parametri: $X_0, Y_0, L_x, L_y, H, \theta, \alpha$ (da Maas e Vosselman, 1999).

permettono sia di individuare la posizione e l'orientamento (azimutale) del tetto dell'edificio, sia di ricostruire le dimensioni della pianta rettangolare di base, l'altezza e la pendenza delle falde. I modelli più comunemente applicati sono l'edificio con tetto orizzontale (definito da 6 parametri), quello a due falde spioventi simmetrico (7 parametri) o asimmetrico (8 parametri) e il modello a 4 falde (9 parametri).

I singoli parametri vengono stimati cercando di minimizzare le differenze tra il modello ipotizzato e l'insieme di punti laser che descrivono l'oggetto, in modo tale da ottenere un adattamento ottimale alla realtà. Le tipologie sopra elencate sono evidentemente molto semplici e caratteristiche di zone residenziali a bassa densità abitativa: per questo motivo l'approccio parametrico è in genere poco adatto alla ricostruzione di centri storici o di zone densamente edificate.

Maas e Vosselman (1999) propongono la stima dei parametri incogniti imponendo la condizione di invarianza dei momenti di ordine superiore della distribuzione delle quote dei punti laser. In Figura 25 è rappresentato un edificio a due falde simmetriche, definito univocamente dai seguenti sette parametri: posizione del baricentro X_0, Y_0 , lunghezza L_x , larghezza L_y , altezza H , orientamento θ , pendenza della falda α . Anche Weidner e Foerstner (1995) studiano la distribuzione delle quote dei punti laser, dopo aver localizzato una regione connessa di punti che corrisponde con alta probabilità ad un edificio. Innanzitutto si stima il baricentro della pianta e il suo orientamento dalle direzioni principali della stessa e, definito il rettangolo che meglio ne approssima il contorno, si valuta la lunghezza dei lati. In seguito si stima l'altezza del modello per differenza rispetto al terreno circostante definendo una quota di gronda media sul contorno.

Brenner (1999) invece utilizza un DSM laser e la disponibilità della planimetria degli edifici da una cartografia numerica per applicare il model-

lo parametrico. Gli edifici vengono suddivisi in primitive rettangolari 2D e per ciascuna di esse si selezionano le primitive 3D (falde piane inclinate o pareti) basandosi sull'analisi del DSM. Per ogni primitiva 3D vengono poi stimati i parametri caratteristici, quali spigoli, vertici, orientamento dei vettori normali, che permettono, attraverso un opportuno assemblaggio di tutte le primitive, di ricostruire il modello 3D.

Il principale vantaggio di tutti i metodi parametrici è sicuramente la consistenza del modello che si ottiene: se l'adattamento ai dati è buono, il modello ha la garanzia di essere topologicamente e geometricamente coerente, senza che siano necessarie altre verifiche (Forlani, 2003). Inoltre non risulta essere necessaria l'operazione di segmentazione illustrata al capitolo precedente. Come già detto, l'applicabilità del metodo risulta ristretta tuttavia a casi semplici e il numero di edifici così ricostruibili è quindi limitato, soprattutto in presenza di una tipologia edilizia così diversificata come quella italiana.

Per superare queste limitazioni, i modelli parametrici sono stati raffinati e migliorati (Brenner, 2000) e le principali metodologie di evoluzione sono (vedi Figura 26):

- combinazione di modelli parametrici;
- modelli prismatici: permettono di ricostruire edifici aventi pianta di forma qualsiasi, limitandosi ad attribuire ad essi un tetto piano di quota media delle altezze;
- modelli poliedrici: consentono di modellare edifici complessi, in cui la pianta è scomponibile in rettangoli per sovrapposizione di più elementi (Vosselman, 1999), conservando così la semplicità dei modelli parametrici classici che richiedono la stima di pochi parametri.

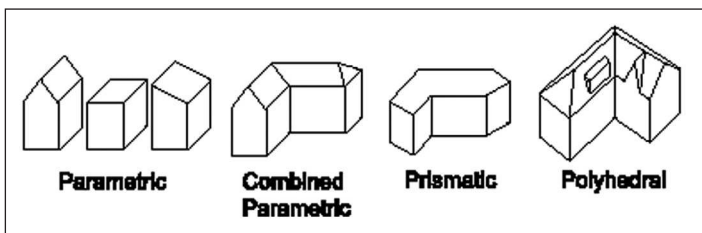


Figura 26 - Evoluzione dei modelli applicati per la ricostruzione degli edifici (da Brenner, 2000).

Modelli non parametrici

I modelli generici, a differenza di quelli parametrici, non definiscono a priori una tipologia predefinita di edificio e quindi non impongono vincoli di tipo geometrico. La ricostruzione si basa sulla segmentazione che è stata condotta nella fase precedente e, a partire da questa, si realizza per raggruppamento e composizione delle superfici piane del tetto e delle pareti estratte dai dati laser. Si ricostruisce cioè la topologia nella rappresentazione vettoriale del tetto, all'interno della quale ogni falda è un poligono nello spazio definito da un numero limitato di lati 3D: si stabiliscono le relazioni di adiacenza tra le falde individuando

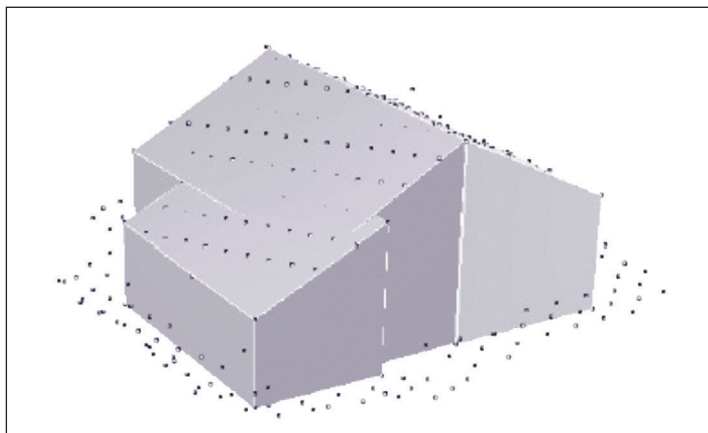


Figura 27 - Modello generico di edificio (da Rottensteiner e Briese, 2003).

linee di colmo, di displuvio e di compluvio e si determinano i vertici delle falde per intersezione dei singoli lati.

La stima dell'altezza dell'edificio si effettua semplicemente confrontando la quota della linea di colmo con quella dei punti terreno.

Un esempio di modellazione generica è quella proposta da Rottensteiner e Briese (2003) che estraggono i piani di falda del tetto sfruttando una segmentazione gerarchica basata sul comportamento statico dei vettori normali rispetto al DSM; successivamente, individuata la topologia delle falde e calcolati i poligoni di contorno, si ricostruisce la geometria 3D dell'edificio (vedi Figura 27).

Come è facilmente comprensibile, questi modelli sono sicuramente più flessibili di quelli parametrici in quanto permettono di ricostruire tipologie di tetto e aggregazioni di edifici irregolari più complesse e più simili a quelle che si possono incontrare in un centro storico; risulta però più difficile controllare l'affidabilità della ricostruzione ottenuta, dal momento che la topologia delle falde e delle pareti è ricostruita sulla base dei soli dati. Per questo motivo spesso si sfruttano le informazioni direttamente deducibili da ortofoto o immagini relative all'oggetto edificio (se disponibili) come termini di confronto e di verifica del modello generato.

La modellazione con TerraScan

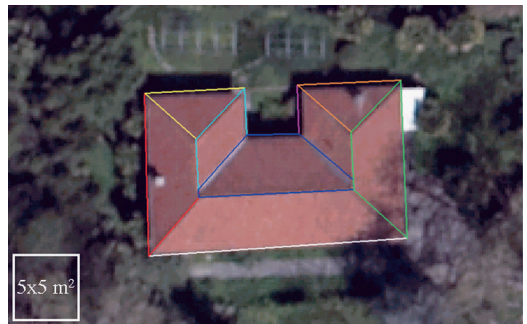
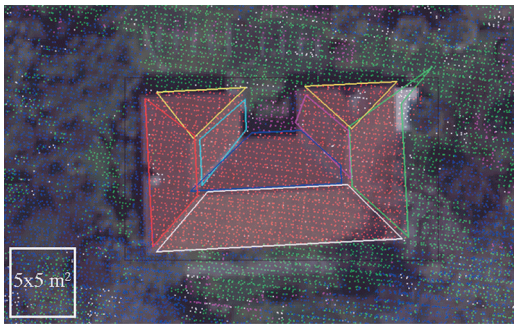
L'approccio adottato dal comando *"Construct building"* di TerraScan per la ricostruzione degli edifici segue propriamente un modello di tipo generico, che non è legato quindi a specifiche tipologie di edifici né a vincoli geometrici: le superfici piane del tetto e delle pareti sono estratte direttamente dai dati per segmentazione dei punti e la ricostruzione del modello avviene raggruppando e assemblando opportunamente gli elementi individuati.

Inizialmente l'algoritmo di modellazione regolarizza le polilinee 3D chiuse, precedentemente ricostruite (vedi Figura 22, a destra), al fine di ottenere piani di falda aventi forma poligonale. Tale regolarizzazione

viene successivamente affinata “manualmente” apportando le opportune modifiche grazie alla disponibilità di una serie di opportuni comandi di *editing* assistito, quali “*Auto align boundaries*”, “*Delete Boundary vertex*”, “*Align boundary segment*” e “*Modify boundary shape*”.

A partire dalle falde regolarizzate, si ricostruiscono le loro relazioni topologiche con l’eventuale supporto “visivo” dell’ortofoto: si uniscono segmenti-falde adiacenti aventi uguale pendenza od orientamento e si stabilisce la posizione delle linee di intersezione e/o *step edges* (ovvero di spigoli tra due superfici lungo i quali si verifici un notevole dislivello). Il risultato finale è rappresentato in Figura 28, a destra: da un confronto immediato con l’ortofoto è possibile comprendere immediatamente la bontà della ricostruzione effettuata.

Figura 28 - Modellazione del tetto dell’edificio: a sinistra estrazione delle 8 falde, a destra le stesse falde dopo la regolarizzazione.



Aggregando le *features* in insiemi coerenti si ottiene la struttura del tetto e si procede inserendo gli elementi che permettono di ultimare la modellazione dell’edificio, ovvero i piani verticali delle pareti, là dove vi siano degli *step edge* e un piano orizzontale alla base di tali pareti (al livello del “piano terreno”) che chiuda il volume in un unico solido 3D. Questa operazione con il comando “*Construct building*” avviene in modo del tutto automatico (vedi Figura 29), dopo aver definito a priori una serie di valori dimensionali di tipo edilizio (*Building 3D model settings*), quali la sporgenza della gronda, lo spessore del tetto, la profondità nel terreno, ecc.

Estendendo tale procedura all’edificato di un’intera città, è possibile ricostruirne una rappresentazione tridimensionale (*3D city model*). Allo stato attuale è in via di realizzazione il *3D city model* per il centro storico di Gorizia, riprodotto parzialmente nelle Figure 30 e 31. Alcuni dettagli relativi al colle del castello di Gorizia sono riportati in Crosilla, Visintini e Fico (2004).

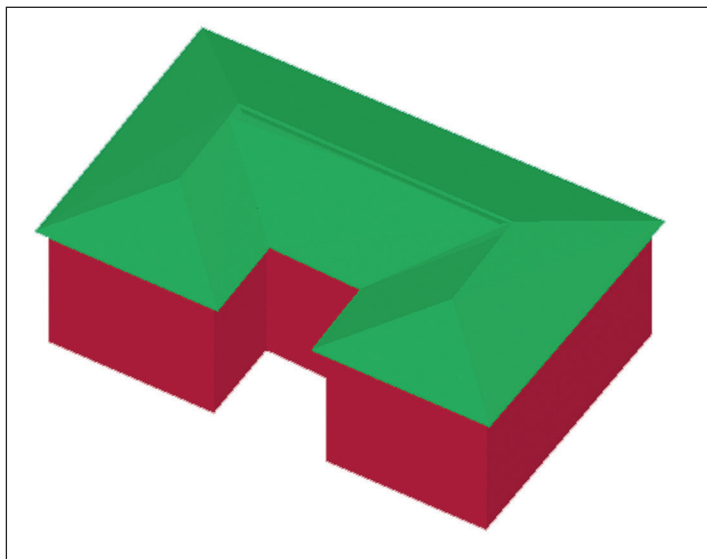
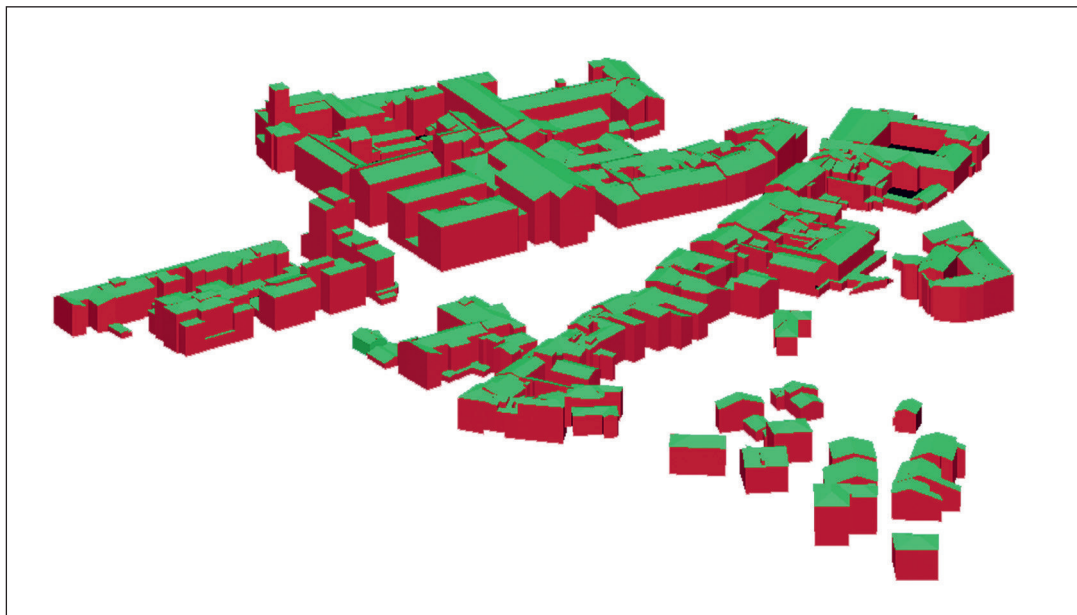


Figura 29 - Vista assonometria del modello solido completo dell'edificio precedente.

Figura 30 - Vista prospettica del 3D City Model di parte del centro storico di Gorizia.



8. Verosimiglianza e accuratezza della modellazione laser

Al fine di valutare l'attendibilità dei risultati ottenuti nella modellazione di edifici da dati laser, si è proceduto alla verifica dei modelli prodotti a partire da due diversi *dataset* laser (vedi Figura 32), differenti per modalità di acquisizione dei dati e per densità di campionamento. Il confronto è stato poi esteso a modelli di edifici ricostruiti a partire da un diverso supporto informativo quale la Cartografia Tecnica Regionale Numerica (CTRN) in scala 1:5.000 (con precisione equivalente alla



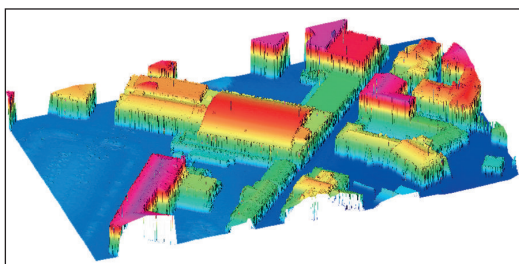
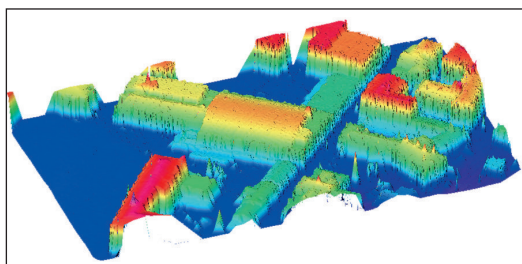
scala 1:2.000), cioè il classico prodotto di un rilevamento fotogrammetrico tradizionale.

Il primo *dataset* laser elaborato proviene da un volo effettuato sulla città di Gorizia nel novembre del 2003: l'acquisizione è avvenuta per mezzo di strisciate parallele con una densità media di campionamento di 2 p.ti/mq.

Il secondo *dataset*, invece, è stato ottenuto nell'aprile del 2004, con un volo che ha ricoperto la sola zona del centro storico di Gorizia per una superficie complessiva superiore a 1 kmq. L'acquisizione è avvenuta, in questo caso, per strisciate incrociate con una densità di campionamento di circa 7 p.ti/mq per strisciata e di 15 p.ti/mq per l'intero rilievo: per la sovrapposizione delle strisciate, la densità in alcune zone è pari anche a 25-30 p.ti/mq.

Figura 31 - Vista prospettica del 3D City Model di parte del centro storico di Gorizia con sovrapposta l'ortofoto digitale.

Figura 32 - Particolare di DSM ricostruiti da scansioni a diversa densità di campionamento: a sinistra a 2 p.ti/mq, a destra a 15 p.ti/mq.



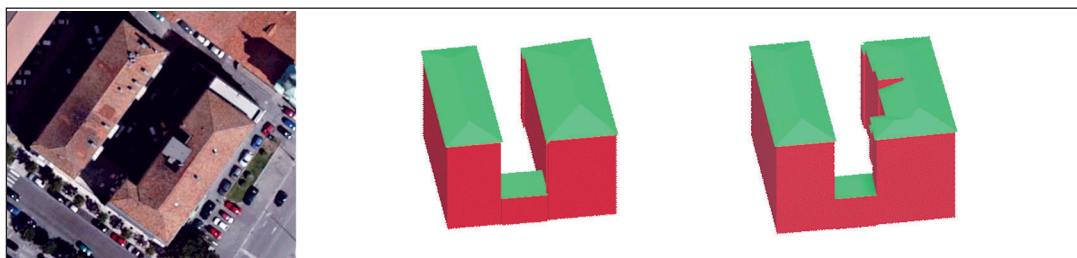
Entrambi i *dataset* sono stati elaborati adottando le medesime procedure ed ottenendo risultati soddisfacenti o meno a seconda della specifica fase considerata.

Per quanto riguarda il filtraggio del terreno, da un rapido confronto tra i DTM prodotti nei due diversi casi non si sono osservate particolari differenze dal punto di vista della ricostruzione morfologica del territorio in esame. Non si deve trascurare tuttavia l'eccessiva rumorosità del DTM ricavato dai punti terreno appartenenti al *dataset* ad alta densità di campionamento, che quindi appare ridondante e necessita di operazioni di *thinning* e *smoothing* al fine di renderlo più omogeneo.

Diverse invece sono le considerazioni emerse dal confronto tra i risultati ottenuti nelle fasi di classificazione degli oggetti 3D. Innanzitutto, gli algoritmi di localizzazione delle regioni di punti edificio hanno spesso fallito nel *dataset* a 2 p.ti/mq a causa della scarsità di informazioni rilevate sul generico edificio. Di conseguenza anche la classificazione ha dato scarsi risultati, a differenza di quanto si è potuto ricavare a partire dal *dataset* ad alta densità di campionamento. La localizzazione e la classificazione di edifici e di oggetti 3D in generale risultano quindi essere tanto più accurate quanto maggiore è il numero di punti che vengono acquisiti sulle loro superfici.

Simili sono le conclusioni alle quali si è pervenuti confrontando i modelli ricostruiti con i due differenti *dataset*, dal momento che la modellazione dell'edificio si è mostrata dipendere significativamente dai risultati ottenuti nella fase di classificazione. Sui modelli 3D ricostruiti si sono riflessi tutti gli errori prodottisi nella classificazione: ad esempio, a causa del basso livello di dettaglio del *dataset* a 2 p.ti/mq, l'algoritmo di classificazione degli edifici talvolta ha erroneamente classificato i pochi punti sparsi rilevati su un camino o un'antenna come appartenenti alla falda del tetto e di conseguenza, nella modellazione, le pendenze medie delle falde sono risultate minori di quelle reali e l'altezza dell'edificio maggiorata anche di decine di centimetri. Le informazioni relative all'effettiva forma dell'edificio vanno così perse e quindi, anche per la modellazione degli edifici, una bassa densità di campionamento è decisamente sconsigliabile, mentre i risultati ottenuti con un *dataset* ad alta densità sono promettenti, come è possibile osservare dalle immagini di Figura 33. La verosimiglianza dipende quindi dalla densità con cui i dati sono stati acquisiti durante il rilievo.

Figura 33 - Esempio di modellazione di un edificio di Gorizia (ortofoto a sinistra): confronto tra modello ricostruito a bassa (al centro) e ad alta (a destra) densità di campionamento.



Per poter confrontare in modo significativo i modelli laser con i modelli ricostruibili dalla CTRN si è adottato un approccio diverso, volto a verificare quantitativamente la precisione dei prodotti ottenuti con le diverse tipologie di dati analizzati. È stata scelta la CTRN come termine di confronto da adottare in quanto trattasi di una forma di rappresentazione dei dati di facile elaborazione e in grado di fornire informazioni geometriche caratterizzate da accuratezza comunque nota e omogenea.

L'oggetto del confronto è stata la volumetria dell'edificio, calcolata in base alle diverse informazioni desumibili dai diversi *dataset* laser e dalla CTRN.

Dalla CTRN per ciascuna struttura è nota:

- l'area di base dell'edificio, che coincide con la superficie racchiusa dal poligono di contorno;
- l'altezza dell'edificio, che nel calcolo del volume è data dalla differenza tra la quota minima di gronda e la quota al piede;

È così calcolabile il "volume" dell'edificio, o meglio il volume del parallelepipedo costruito con base e altezza come definite precedentemente e quindi calcolato a meno del volume del sottotetto.

Dal rilievo laser e dalla successiva modellazione si definiscono per ogni edificio:

- l'area dell'edificio corrispondente a quella del modello creato;
- l'altezza massima data dalla linea di colmo, ma risulta nota anche la quota di gronda (sempre rispetto al terreno);

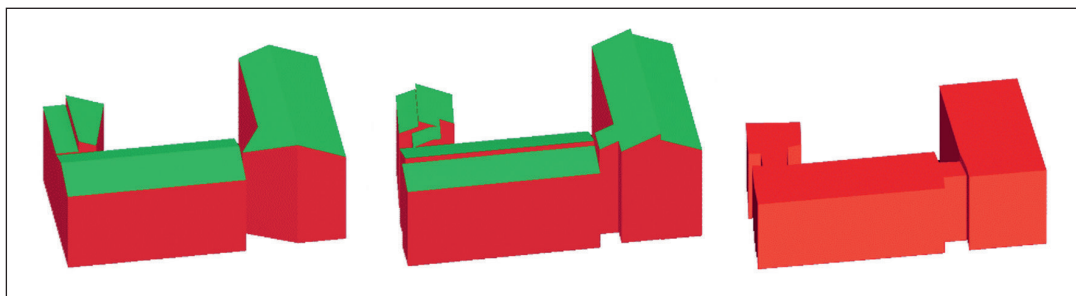
Il volume dell'edificio corrisponde sempre a quello del modello e quindi comprendente anche il tetto.

Quindi la principale differenza tra i due tipi di modelli analizzati, al di là del confronto quantitativo che verrà di seguito illustrato, sta nella possibilità del laser di ricavare il volume del sottotetto, informazione non ricavabile dalla CTRN e dalla maggior parte delle cartografie numeriche che non prevedono di restituire la forma completa del tetto.

In base a quanto detto, per rendere coerenti le entità da comparare si è proceduto all'eliminazione dei tetti nel dimensionamento dei modelli ricavati dai dati laser e si è assunta per questi l'altezza minima di gronda come altezza del parallelepipedo così ottenuto.

Parte dei risultati ottenuti sono riassunti nelle tabelle seguenti (Tabelle 3, 4, 5) in cui sono riportati le misure di area, altezza e volume di 10 modelli analizzati. Nelle successive Tabella 6, Tabella 7, Tabella 8 invece sono riportate le variazioni percentuali emerse da un confronto incrociato tra le relative dimensioni dei modelli laser e dei modelli estratti dalla CTRN.

Figura 34 - Esempio di modellazione di un edificio da dati laser con densità di 2 p.ti/mq (a sinistra) e di 15 p.ti/mq (al centro); dalla CTRN (a destra).



	laser 2 p.ti/mq		
	area (m²)	altezza (m)	volume (m³)
ED 1	187,28	7,55	1414,32
ED 2	170,25	6,55	1104,79
ED 3	440,80	14,73	6491,67
ED 4	258,06	7,72	1993,53
ED 5	519,44	8,25	4286,27
ED 6	951,66	15,66	14902,85
ED 7	143,12	11,62	1663,22
ED 8	99,41	6,15	611,06
ED 9	316,61	11,77	3727,90
ED 10	1176,80	19,27	20988,63

Tabella 3 - Dimensioni dei modelli ricostruiti da dati laser con 2 p.ti/mq.

	laser 15 p.ti/mq		
	area (m²)	altezza (m)	volume (m³)
ED 1	186,61	6,49	1211,63
ED 2	170,18	6,56	1116,88
ED 3	450,42	14,68	6612,18
ED 4	253,74	7,67	1946,89
ED 5	512,93	7,99	4099,62
ED 6	915,98	14,70	13460,69
ED 7	141,87	10,76	1526,89
ED 8	99,90	4,81	480,65
ED 9	320,11	11,71	3740,12
ED 10	1164,79	19,21	20785,81

Tabella 4 - Dimensioni dei modelli ricostruiti da dati laser con 15 p.ti/mq.

	CTRN		
	area (m²)	altezza (m)	volume (m³)
ED 1	186,78	7,21	1346,67
ED 2	159,38	6,24	994,54
ED 3	405,97	15,01	6093,63
ED 4	234,60	7,44	1745,41
ED 5	493,93	7,18	3546,42
ED 6	915,49	14,50	13274,58
ED 7	102,79	10,12	1040,24
ED 8	111,64	4,96	553,74
ED 9	304,64	12,23	3725,75
ED 10	1149,69	18,15	20705,66

Tabella 5 - Dimensioni dei modelli ricostruiti da CTRN.

	laser2 vs laser15		
	ΔA%	Δh%	ΔV%
ED 1	0,36	16,31	16,73
ED 2	0,04	-0,25	-1,08
ED 3	2,14	0,32	-1,82
ED 4	1,70	0,68	2,40
ED 5	1,27	3,24	4,55
ED 6	3,89	6,56	10,71
ED 7	0,88	7,98	8,93
ED 8	-0,49	27,76	27,13
ED 9	-1,09	0,57	-0,33
ED 10	1,03	0,32	0,98
MEDIA	0,55	6,35	6,82
MEDIANA	0,96	1,96	3,47
DEV.STAND	1,66	9,14	9,29

Tabella 6 - Scarti percentuali calcolati tra le dimensioni dei modelli laser2 e laser15.

laser2 vs CTRN

	$\Delta A\%$	$\Delta h\%$	$\Delta V\%$
ED 1	0,27	5,27	5,58
ED 2	6,39	4,68	9,87
ED 3	7,73	-1,93	6,02
ED 4	9,25	3,71	12,74
ED 5	4,97	13,41	18,05
ED 6	3,95	7,89	12,10
ED 7	28,43	13,95	40,80
ED 8	-12,24	24,67	11,93
ED 9	3,74	-3,89	0,06
ED 10	2,33	5,85	1,36
MEDIA	5,48	7,36	11,85
MEDIANA	4,46	5,56	10,90
DEV.STAND	10,02	8,30	11,56

Tabella 7 - Scarti percentuali calcolati tra le dimensioni dei modelli laser2 e dei modelli ricostruiti dalla CTRN.

laser15 vs CTRN

	$\Delta A\%$	$\Delta h\%$	$\Delta V\%$
ED 1	-0,09	-11,04	-11,15
ED 2	6,34	4,92	10,95
ED 3	9,87	-2,25	7,84
ED 4	7,55	3,03	10,35
ED 5	3,70	10,17	13,49
ED 6	0,05	1,33	1,38
ED 7	27,54	5,97	31,87
ED 8	-11,75	-3,09	-15,21
ED 9	4,83	-4,46	0,38
ED 10	1,30	5,54	0,39
MEDIA	4,81	1,01	5,03
MEDIANA	4,27	2,18	4,61
DEV.STAND	9,42	6,25	13,30

Tabella 8 - Scarti percentuali calcolati tra le dimensioni dei modelli laser15 e dei modelli ricostruiti dalla CTRN.

Dalla Tabella 6, si può osservare che, nel confronto tra i modelli ottenuti da rilievi a diversa densità di campionamento, che chiameremo rispettivamente *laser2* e *laser15*, gli scarti percentuali relativi ai valori delle aree, variano da 0,0%, a 3,89% e quindi la differenza in pianta tra i due modelli può essere considerata poco significativa. È da notare come le aree relative ai modelli *laser2* risultino sempre di dimensioni leggermente maggiori a causa della potenziale presenza di occlusioni prospettiche che si hanno in un *dataset* proveniente da rilievo a bassa densità di campionamento.

Per quanto riguarda invece le altezze, i loro scarti percentuali variano in un *range* più ampio rispetto ai valori precedenti (da 0,2%, a 27,8%), mettendo in luce la problematica precedentemente illustrata: nel caso del *dataset* a bassa densità di campionamento, infatti, la scarsità di informazioni relative alla struttura del tetto e al contorno dell'edificio unita conseguentemente ad una non precisa classificazione portano ad una modellazione errata delle falde e quindi ad errori nella valutazione della quota di gronda del tetto.

Diverso invece è il discorso da farsi per i volumi: anche in questo caso il campo di variazione delle percentuali è abbastanza elevato (da 0,33%

a 27,13%) e, come si osserva dalla distribuzioni dei dati, esso è prevalentemente influenzato dallo scarto tra le altezze piuttosto che da quello relativo alle aree. L'errore sulle altezze modifica significativamente la geometria del modello *laser2* che quindi risulta non solo meno accurato nella ricostruzione, come detto in precedenza, ma anche avente dimensioni meno precise rispetto a quelle che si possono ottenere con 15 p.ti/mq.

La Tabella 7 riporta i valori degli scarti percentuali calcolati per il modello *laser2* e per il modello ricostruito a partire dalla CTRN.

Nella Tabella 8 sono riassunti i risultati percentuali relativi agli scarti che sono stati calcolati tra le dimensioni stimate nel caso *laser15* e nella CTRN.

Dai risultati si può affermare che la densità di campionamento diventa un fattore determinante nella ricostruzione degli edifici sia per quanto riguarda il grado di verosimiglianza della modellazione sia per l'accuratezza con cui questa viene effettuata. Rispetto alla CTRN la tecnica laser consente di ottenere informazioni relative al tetto e quindi di ricavare un modello che risulta completo nella sua descrizione geometrica e nella sua rappresentazione.

Per quanto riguarda il dimensionamento degli edifici, si è notato che il modello prodotto a partire da un *dataset* a bassa densità di campionamento tende in genere a sovrastimare le dimensioni dell'edificio stesso, rispetto sia al modello ricavato dal *dataset* ad alta densità sia a quello relativo alla CTRN a causa degli errori che la classificazione riflette sulla modellazione.

Minori sono invece le differenze del modello *laser15* rispetto al modello della CTRN, anche se non bisogna dimenticare che il primo è stato troncato eliminando qualsiasi informazione relativa alla struttura del tetto. Da questo punto di vista, quindi, più preciso e completo, oltre che più verosimile, risulta essere il modello *laser15*.

Non è stata invece messa in luce una problematica che è emersa durante il confronto, ovvero che gli scarti maggiori, e quindi presumibilmente i maggiori errori, si sono verificati nel caso di edifici di piccole dimensioni piuttosto che per edifici medio-grandi. Infatti, minore è la superficie dell'oggetto rilevato, minore è il numero di punti che lo colpiscono;

conseguenza immediata è l'estrema difficoltà con cui la regione di punti corrispondente all'oggetto viene localizzata, classificata e quindi modellizzata. Pertanto maggiori sono le dimensioni dell'edificio migliori sono i risultati che si ottengono dalla modellizzazione, sia in termini di verosimiglianza che di accuratezza.

9. Conclusioni

L'articolo descrive innanzitutto le tecniche di filtraggio, classificazione, segmentazione e modellazione che vengono applicate ai dati spaziali ottenuti da un rilievo laser aereo. Successivamente sono illustrati i primi risultati della sperimentazione condotta su dati acquisiti con diverse frequenze di campionamento sopra la città di Gorizia con il sistema Optech ALTM 3033. A fronte di numerose problematiche ancora aperte, quali la difficoltà di fissare correttamente i valori di soglia dei parametri che si devono definire per realizzare le varie operazioni di *data processing* e l'impossibilità di stabilire in modo preciso ed automatico gli effettivi contorni degli oggetti modellizzati, i risultati sembrano essere molto incoraggianti per il grado di accuratezza e il livello di verosimiglianza raggiunto.

Bibliografia di riferimento

- AA.VV. (2001). Supplemento Speciale al n. 2/2001 del Bollettino SIFET.
 Crosilla F., Galetto R. (a cura di) (2003). La tecnica del laser scanning: teoria e applicazioni. Collana di Geodesia e Cartografia. International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine.
 Wehr A., Lohr U. (editors) (1999). Special Issue on "Airborne Laser Scanning". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 54, Issue 2-3 (1999).

Bibliografia citata

- Andersen H.-E., Reutebuch S. E., Schreuder G. F. (2002). Bayesian object recognition for the analysis of complex forest scenes in airborne laser scanner data. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIV, 3A, Graz, pp 35-41.
 Atkinson A., Riani M. (2000). Robust diagnostic regression analysis. Springer Verlag, New York.
 Axelsson P. (1999). Processing of laser scanner data - algorithms and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, n. 54 (1999), pp 138-147.
 Axelsson P. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, B4/1, Amsterdam, pp 110-117.
 Besl P.J., McKay N.D.M. (1992). A method for registration of 3D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, n. 14 (2), pp 239-256.
 Brenner C. (1999). Interactive modelling tools for 3D building reconstruction. Photogrammetric Week 99, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp 23-34.
 Brenner C. (2000). Towards fully automatic generation of city models. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, B3/1, Amsterdam, pp 85-92.
 Briese C., Pfeifer N. (2001). Airborne laser scanning and derivation of digital terrain models. In Gruen/Kahmen (eds.) "Optical 3-D Measurement Techniques V", Vienna, pp 80-87.
 Brovelli M.A., Reguzzoni M., Sansò F., Venuti G. (2001). Modelli matematici del terreno per mezzo di interpolatori a spline. Bollettino SIFET, Supplemento Speciale al n. 2 (2001), pp 55-80.
 Brovelli M.A. (2003). Filtraggio di dati laser per rimozione di forme. In Crosilla/Galetto (ed.) "La tecnica del laser scanning: teoria e applicazioni". International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, pp 113-132.
 Burman H. (2000). Adjustment of laser scanner data for correction and orientation errors. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, B3/1, Amsterdam, pp 125-133.
 Burman H. (2002). Laser strip adjustment for data calibration and verification. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIV, 3A, Graz, pp 67-72.
 Casella V. (2003). Introduzione al laser scanning. In Crosilla/Galetto (ed.) "La tecnica del laser scanning: teoria e applicazioni". International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, pp 1-37.
 Cerioli A., Riani M. (2003). Robust methods for the analysis of spatially autocorrelated data. Journal of the Italian Statistical Society, n. 11 (2003), pp 334-358.
 Chen Y., Medioni G. (1992). Object modelling by registration of multiple range views. Image & Vision Computing, n. 10(3), pp 145-155.
 Crosilla F. e Beinat A. (2003). Tecniche avanzate di allineamento di scansioni laser. In Crosilla/Galetto (ed.) "La tecnica del laser scanning: teoria e applicazioni". International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, pp 75-99.
 Crosilla F., Visintini D., Fico B. (2004). Classificazione e modellazione solida 3D dell'edificio urbano da rilievo laser aereo: prime applicazioni alla città di Gorizia. In atti dell'VIII Conferenza Nazionale ASITA, vol. I, pp 931-936. Roma 14-17 Dicembre 2004.
 Crosilla F., Visintini D., Prearo G. (2003). Filtraggio di dati laser altimetrici con modelli autoregressivi SAR ed algoritmi di ricerca dinamica BFS (Block Forward Search). In atti della VII Conferenza Nazionale ASITA, vol. I, pp 885-890. Verona 28-31 Ottobre 2003.
 Crosilla F., Visintini D., Prearo G. (2004a). A robust method for filtering non-ground measurements from airborne LIDAR data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXV, B3, Istanbul, pp 196-201.
 Crosilla F., Visintini D., Prearo G. (2004b). Sperimentazione in ambito urbano dell'algoritmo autoregressivo SFS (Spatial Forward Search) per il filtraggio dei dati laser. In atti dell'VIII Conferenza Nazionale ASITA, vol. I, pp 937-942. Roma 14-17 Dicembre 2004.
 Elmqvist M. (2001). Ground estimation of laser radar data using active shape models. In Proceedings of the OEEPE Workshop on airborne laserscanning and interferometric SAR for detailed digital elevation models, Stockholm. OEEPE Publication, n. 40.
 Filiñ S. (2001) Calibration of spaceborne and airborne laser altimeters using natural surfaces. PhD Dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio-State University, Columbus.
 Filiñ S. (2002). Surface clustering from airborne laser scanning data. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIV, 3A, Graz, pp 117-124.
 Forlani G. (2003). Il laser a scansione aviotrasportato: applicazioni in campo urbano. In Crosilla/Galetto (ed.) La tecnica del laser scanning: teoria e applicazioni. International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, pp 157-172.
 Jacobsen K., Lohman (2003). Segmented filtering of laser scanners DSMs. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIV, B/W13, Dresden, pp 87-92.
 Kager H., Kraus K. (2001). Height discrepancies between overlapping laser scanner strips. In Gruen/Kahmen (eds.) "Optical 3-D Measurement Techniques V", Vienna, pp 103-110.
 Kilian J., Haala N., Englich M. (1996). Capture and evaluation of airborne laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXI, B3, Vienna, pp 383-388.
 Kraus K., Pfeifer N. (1997). A new method for surface reconstruction from laser scanner data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXII, 3-2W3, Haifa, pp 80-86.
 Maas H.-G., Vosselman G. (1999). Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, n. 54, pp 153-163.
 Nardinocchi C., Forlani G., Zingaretti P. (2003). Classification and filtering of laser data. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIV, B/W13, Dresden, pp 79-86

- Pfeifer N., Kostli A., Kraus K. (1998). Interpolation and filtering of laser scanner data - implementation and first results. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXII, 3/1, Columbus, pp 153-159.
- Roggero M. (2001). Airborne laser scanning: clustering in raw data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV, B3/W4, Annapolis, pp 227-232.
- Roggero M. (2002). Object segmentation with region growing and principal component analysis. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, 3A, Graz, pp 289-294.
- Rottensteiner F., Briesche C. (2002). A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, 3A, Graz, pp 295-301.
- Rottensteiner F., Briesche C. (2003). Automatic generation of building models from LIDAR data and the integration of aerial images. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, pp 174-180.
- Sithole G. (2001). Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV, B3/W4, Annapolis, pp 203-210.
- Sithole G., Vosselman G. (2003). Comparison of filtering algorithms. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, B/W13, Dresden, pp 71-78.
- Sohn G., Dowman I. (2002). Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, 3A, Graz, pp 336-344.
- Voegtli T., Steinle E. (2003). On the quality of object classification and automated building modelling based on laserscanning data. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, B/W13, Dresden, pp 149-155.
- Vosselman G. (1999). Building reconstruction using planar faces in very high density height data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXII, 3-2W5, Munich, pp 87-92.
- Vosselman G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIII, B4, Amsterdam, pp 958-964.
- Vosselman G., Maas H.-G. (2001). Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. In *Proceedings of the OEEPE Workshop on airborne laserscanning and interferometric SAR for detailed digital elevation models*, Stockholm, OEEPE Publication, n. 40, pp 62-72.
- Vosselman G. (2003). 3D reconstruction of roads and trees for city modelling. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, B/W13, Dresden, pp 231-236.
- Wack R., Wimmer A. (2002). Digital Terrain Models from airborne laser scanner data - A grid based approach. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, 3B, Graz, pp 29-296.
- Weidner U., Foerstner W. (1995). Towards automatic building extraction from high resolution digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 50(4), pp 38-49.
- Zhang K., Chen S.C., Whitman D., Shyu M. L., Yan J., Zhang C. (2003). A progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne LIDAR data". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, n. 41(4), pp 872-882.
- www.optech.on.ca
www.terrasolid.fi