

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento: Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

Applicazione della tecnologia LiDAR nell'analisi
volumetrica di eventi di colate detritiche in
ambiente alpino

Relatore:

Prof. Alberto Guarnieri

Laureando:

Fabio Bottazzo

Matricola n.

1062554

ANNO ACCADEMICO 2013 - 2014

Ai miei nonni

RIASSUNTO

L'area di Fiames è situata a circa 4 km a nord di Cortina d'Ampezzo, nella valle scavata dal torrente Boite, compresa tra il gruppo delle Tofane ad ovest e le cime del Pomagagnon e delle Pezories ad est.

Nella zona di transizione tra le pareti rocciose verticali ed i ghiaioni sottostanti hanno origine numerosi canali da colata detritica, alcuni dei quali monitorati, che incidono i ghiaioni stessi fino al fondovalle.

Questi canali sono frequentemente interessati da eventi di colata detritica (*debris flow*) che mobilitano ingenti quantità di detrito, modificando la morfologia dei propri alvei, oltre a costituire un potenziale rischio per l'uomo.

E' il caso del canale da colata n° 8 (c08), dove, a luglio e agosto 2011 si sono verificati tali fenomeni; in più a luglio 2013 è stato registrato il crollo parziale di una parete rocciosa che ha liberato nel canale diversi metri cubi di sedimenti.

Sulla base di rilievi LiDAR eseguiti tra il 2006 e 2013 è stata valutata la loro applicabilità per la ricostruzione della superficie topografica del canale e la stima dei volumi mobilizzati dalle colate detritiche.

Infine, per evidenziare le variazioni morfologiche dell'alveo del canale, sono state confrontate sezioni GPS del 2010 e 2011, rilevate in zone molto prossime tra loro, insieme alle corrispondenti sezioni estratte dai modelli digitali del terreno (DEM) del 2011 e del 2013.

ABSTRACT

The area of Fiames is located about 4 km north to Cortina d'Ampezzo, in the valley carved by the river Boite, between the group of Tofane to the west and the peaks of Pomagagnon and Pezories to the east.

In the transition zone between the vertical rock faces and the screes below numerous debris flow channels originate, some of which are monitored, that affect the same screes till the valley bottom.

These channels are frequently affected by debris flow events that mobilize large amounts of debris, changing the morphology of their bed, in addition to being a potential risk for humans.

It's the case of the casting channel n ° 8 (c08), where, in July and August 2011 there have been these phenomena; in addition in July 2013 was recorded the partial collapse of rock wall that has released in channel several cubic meters of sediment.

Based on LiDAR surveys carried out between 2006 and 2013 was assessed their applicability for the reconstruction of the surface topography of the channel and the estimated of volumes mobilized from debris flows.

Finally, to highlight the morphological changes of the channel bed, were compared section GPS of 2010 and 2011, executed in areas very close to each other, along with corresponding sections extracted from the Digital Terrain Model (DEM) of 2011 and 2013.

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. COLATE DETRITICHE	4
3. AREA DI STUDIO	9
3.1 Inquadramento climatico	10
3.1.1 Pluviometria	10
3.1.2 Termometria	11
3.1.3 Igrometria	11
3.1.4 Ventosità	11
3.1.5 Niviometria	12
3.2 Inquadramento geologico	12
3.3 Il canale “c08” oggetto di studio	13
3.4 Eventi di debris flow nel periodo di studio	15
4. STRUMENTAZIONE TOPOGRAFICA	17
4.1 Laser scanner	17
4.2 Il raggio laser	18
4.3 Principi di funzionamento dei laser	19
4.3.1 Laser scanner distanziometrici	20
4.3.1.1 Distanziometri ad impulsi (sistemi a tempo di volo)	21
4.3.1.2 Distanziometri a misura di fase	22
4.3.2 Laser scanner a triangolazione	23
4.4 Laser scanner aereo	24
4.5 Laser scanner terrestre	26
4.6 La tecnologia LiDAR	29
4.7 Leica C10	31
4.8 Procedura di acquisizione ed elaborazione dei dati	33
4.8.1 Allineamento	35
4.9 Il sistema GPS	36
5. I MODELLI DIGITALI DEL TERRENO	46
5.1 TIN	47
5.2 Grid	48

5.2.1	Natural Neighbour Interpolation	50
5.2.2	Funzioni inverse della distanza pesata	50
6.	ELABORAZIONE DEI DATI	52
6.1	I software utilizzati	52
6.2	Fasi operative	54
7.	RISULTATI E DISCUSSIONI	62
7.1	DTM e metodi di interpolazione	62
7.2	Mappe dei volumi	68
7.3	Mappe di deposito-erosione	73
7.3.1	Analisi del DTM 2010	
7.4	Sezioni	
8.	CONCLUSIONI	86
	BIBLIOGRAFIA	88

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1: Schema della sezione longitudinale di una colata detritica	5
Figura 2.2: Divisione dei tre tratti di una canale da colata	6
Figura 3.1: Inquadramento della provincia di Belluno	9
Figura 3.2: Localizzazione della frazione di Fiames	10
Figura 3.3: Dati ricavati dal bollettino dei valori pluviometrici medi mensili – Centro Meteorologico di Teolo (ARPAV) - Gilardon (Cortina) nel periodo 1992–2011	11
Figura 3.4: Carta Geologica di Fiames; l'area di studio è delimitata in rosso	12
Figura 3.5: Il canale "c08" visto da valle verso monte	14
Figura 3.6: Il canale "c08" visto da monte verso valle	14
Figura 3.7: Ortofoto dell'area di studio	15
Figura 3.8: Parete rocciosa crollata nel 2013	16
Figura 4.1: Schematizzazione dello spettro elettromagnetico	19
Figura 4.2: Coordinate sferiche	20
Figura 4.3: Schema di funzionamento di un laser scanner distanziometrico	20
Figura 4.4: Grandezze misurabili con distanziometri ad impulsi.	22
Figura 4.5: Schema di funzionamento di un laser scanner triangolazione	23
Figura 4.6: Funzionamento del laser scanning	24
Figura 4.7: Esempio di laser scanner da aereo	24
Figura 4.8: Esempio di laser scanner da elicottero	25
Figura 4.9: Acquisizione di un terreno, indicato dal tratteggio, mediante strisciate parallele	25
Figura 4.10: Esempi di strumenti TLS	26
Figura 4.11: Possibili situazioni ambientali nelle quali si può eseguire un rilievo	27
Figura 4.12: Laser Scanner Leica C10	32
Figura 4.13: Ricevitore Topcon "Hiper Pro"	37
Figura 4.14: Ricevitore Topcon "GRS-1" con antenna GNSS "PGA-1"	38
Figura 4.15: Interazione tra i diversi segmenti GPS	38
Figura 4.16: Rappresentazione del segmento spaziale	39
Figura 4.17: Esempi di multipath	41
Figura 4.18: Esempio di un rete NRTK	45
Figura 5.1: Superficie considerata in un DSM contro superficie considerata in un DTM	46
Figura 5.2: Confronto tra un Tin e un raster	47
Figura 5.3: Rappresentazione di un TIN	47
Figura 5.4: Rappresentazione continua di un Grid	49
Figura 5.5: Rappresentazione discreta di un Grid	49
Figura 5.6: Sezione di un DTM ottenuto tramite interpolazione Natural Neighbour e tramite IDW	51
Figura 5.7: DTM ottenuto tramite interpolazione Natural Neighbour e tramite IDW	51
Figura 6.1: Interfaccia di Leica Cyclone 8.0	53
Figura 6.2: Interfaccia di CloudCompare v2	54

Figura 6.3: Interfaccia di ArcMap e ArcToolbox	54
Figura 6.4: Offset Antenna GPS PGA-1 con distanziatore Topcon, offset Target circolare Leica 6" Tilt & Turn, offset centro laser-base tricuspide integrata	57
Figura 6.5: Maschera del canale	59
Figura 6.6: Maschera della parete verticale crollata	60
Figura 7.1: DTM del 2006 ottenuti con interpolazione Natural Neighbour, IDW, e lineare del TIN	63
Figura 7.2: DTM del 2010 ottenuti con interpolazione Natural Neighbour, IDW, e lineare del TIN	64
Figura 7.3: DTM del 2011 ottenuti con interpolazione Natural Neighbour, IDW, e lineare del TIN	65
Figura 7.4: DTM del 2013 ottenuti con interpolazione Natural Neighbour, IDW, e lineare del TIN	66
Figura 7.5: DTM del 2011 e del 2013 della parete rocciosa ruotata secondo l'asse y	68
Figura 7.6: Mappe dei volumi del canale secondo le tre combinazioni	70
Figura 7.7: Mappe dei volumi della parete (originale e "ruotata" secondo l'asse y) relative all'ultima combinazione ALS 2011 – TLS 2013	71
Figura 7.8: Mappe di deposito-erosione del canale secondo le tre combinazioni	73
Figura 7.9: Mappa di deposito-erosione della parete rocciosa (ruotata secondo l'asse y) relativa all'ultima combinazione ALS 2011 – TLS 2013	75
Figura 7.10: Mappe di deposito-erosione a confronto	76
Figura 7.11: LiDAR 2006 e LiDAR 2010 a confronto in CloudCompare	77
Figura 7.12: Mappa dei "volumi" e di "deposito-erosione" del periodo ALS 2006 – ALS 2011	78
Figura 7.13: Mappe di deposito-erosione a confronto	79
Figura 7.14: posizione delle sezioni GPS 2011	80
Figura 7.15: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 1	80
Figura 7.16: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 2	80
Figura 7.17: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 3	81
Figura 7.18: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 4	81
Figura 7.19: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 5	81
Figura 7.20: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 6	81
Figura 7.21: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 7	82
Figura 7.22: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 8	82
Figura 7.23: Posizione delle sezioni confrontate	83
Figura 7.24: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione A	83
Figura 7.25: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione B	84
Figura 7.26: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione C	84
Figura 7.27: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione D	84

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 4.1: Specifiche del rilievo LiDAR 2006	30
Tabella 4.2: Specifiche del rilievo LiDAR 2011	31
Tabella 5.3: Specifiche del laser Leica C10	33
Tabella 6.1: Geometria dei target	55
Tabella 6.2: Stazione permanente di Borca di Cadore della Rete GPS Veneto	56
Tabella 7.1: Cronologia degli eventi	62
Tabella 7.2: Caratteristiche morfometriche del tratto di canale sottoposto alla stima dei volumi mobilizzati	69
Tabella 7.3: Volumi e spessori massimi di deposito ed erosione del canale	74
Tabella 7.4: Volumi e spessori massimi di deposito ed erosione della parete rocciosa	74
Tabella 7.5: Volumi di deposito ed erosione totali	76
Tabella 7.6: Volumi di deposito ed erosione totali	79

1. INTRODUZIONE

Le colate detritiche torrentizie (*debris flow*) sono manifestazioni parossistiche con trasporto impulsivo di sedimenti lungo la rete idrografica secondaria. Esse si manifestano nei bacini idrografici delle aree montane con superficie generalmente inferiore ai 20 km². In ambiente alpino questi fenomeni influiscono in modo piuttosto marcato sull'evoluzione geomorfologica dei fondovalle, quali principali responsabili dei processi d'accumulo sui conoidi alluvionali e dell'immissione di sedimenti nelle aste idrografiche di ordine superiore. In molti casi le zone del bacino maggiormente in pericolo sono quelle terminali, corrispondenti ai conoidi di deiezione. La naturale collocazione degli insediamenti abitativi, produttivi e commerciali in tali zone fa sì che la pericolosità delle colate dia luogo ad un elevato grado di rischio; esse hanno infatti devastanti effetti a causa della rapidità di movimento e della forza d'impatto connessa al rilevante trasporto di materiali litoidi. Quindi l'elevato potere distruttivo e la difficoltosa e pressoché impossibile previsione del verificarsi di un *debris flow* giustificano l'interesse che negli ultimi decenni i ricercatori hanno riposto verso tale tema di studio (Griffiths *et al.*, 2004; Gregoretti & Dalla Fontana, 2007; Coe *et al.*, 2008 a, 2008 b; Gregoretti & Dalla Fontana, 2008; Cesca, 2008; Tecca, P.R. & Genevois R., 2009; Gregoretti *et al.*, 2012; Crucil, 2013).

Storicamente l'attenzione per le colate non è sempre stata così forte; a riguardo è interessante un'affermazione di Castiglioni (1971): "L'autrice continuamente riferisce di fenomeni di tipo *Muren*, o "lave torrentizie", che accompagnano le inondazioni; alla fine dà cenni generali su questi fenomeni, che sono, specie in certe situazioni, per la concomitanza di particolari fattori meteorologici, geologici ed orografici, tra i più importanti nel modellamento dei versanti. Sarà per difficoltà di terminologia, dato che in italiano manca un termine d'uso generale, ma ho l'impressione che spesso, negli studi che appaiono in Italia, non venga completamente descritto e studiato questo fenomeno, che anche nelle nostre Alpi è diffuso con caratteristiche varie, ma abbastanza distinguibili sia dai fenomeni puramente torrentizi, sia da quelli franosi. In alcuni recenti scritti di geologi italiani sulle frane questi fenomeni vengono classificati come "frane di fluimento". La recente espansione delle infrastrutture viarie e dei centri urbani, avvenuta nel secondo dopoguerra nelle zone montane a scopo prevalentemente turistico, spesso ha anteposto criteri di convenienza economica a quelli di sicurezza. I terreni nei conoidi alluvionali, infatti, sono stati tra i più soggetti all'occupazione indiscriminata da parte dei centri ed altre infrastrutture, con un sensibile aumento dell'esposizione al pericolo (Cesca, 2008).

La protezione dal pericolo di colate detritiche, o più in generale da esondazioni ed alluvioni, è divenuta un'esigenza quasi prioritaria negli interventi di sistemazione montana funzionali alla protezione di infrastrutture di vario tipo. Il progressivo interessamento a questo argomento da parte di gruppi di ricerca ed enti preposti alla gestione del territorio ha consentito di approntare degli studi sistematici in modo da approfondire le conoscenze sull'argomento, fino a non molto tempo fa in parte tralasciato a causa della complessità, della scarsa ricorrenza e misurabilità dell'evento. Particolari difficoltà si hanno nella corretta individuazione delle aree sorgenti, nell'interpretazione dei meccanismi di innesco, nella delimitazione delle aree potenzialmente coinvolgibili. Proprio per l'elevata concentrazione di infrastrutture nelle zone di conoide è sempre più sentita l'esigenza di definire le aree potenzialmente interessate da una colata detritica e di pianificare gli interventi e le contromisure per la difesa dei centri abitati e la sicurezza delle vie di comunicazione che attraversano queste zone (Cesca, 2008).

Lo studio delle colate detritiche risulta assai difficoltoso a causa della marcata imprevedibilità temporale del fenomeno, della sua breve durata e della sua elevata forza distruttiva, che rendono l'effettuazione di osservazioni sistematiche e di rilievi di campo difficoltosi e alquanto pericolosi. Negli ultimi decenni molti studi si sono concentrati su tale fenomeno, per capirne il comportamento e cercare di ricavare delle leggi che possano aiutare nella previsione di questi eventi. Infatti, se risultano noti i parametri iniziali legati al movimento della miscela acqua-sedimento (come ad esempio la velocità, la portata, la profondità del flusso, il coefficiente di resistenza al moto, ecc.), l'estensione del deposito a valle può essere calcolata piuttosto agevolmente. Tali parametri sono però pressoché impossibili da rilevare direttamente in campo quando il *debris flow* è in atto, tranne che nei bacini sperimentali dotati di adeguate strumentazioni come videocamere e sensori di livello ad ultrasuoni (Cesca, 2008).

Per ovviare a queste problematiche da poco si stanno usando e testando nuove tecnologie per l'acquisizione in campo di dati e informazioni per lo studio di questi eventi. Un esempio di queste è la tecnologia LiDAR che permette di rilevare in maniera dettagliata il terreno anche in aree difficilmente raggiungibili o particolarmente complesse.

Obiettivo della presente ricerca è proprio quello di analizzare la volumetria multitemporale (dal 2006 al 2013) di un canale a Fiames (BL) tramite l'impiego della tecnologia LiDAR, ossia verificare com'è cambiata la morfologia del canale in seguito ad eventi di colate detritiche e capire se i rilievi svolti con questa strumentazione si prestano a quantificare i volumi mobilizzati, cercando di

capirne anche tutte le problematiche e i limiti connessi alla metodologia. Ciò ci permetterebbe di conoscere e gestire in maniera migliore i fenomeni di *debris flow* nel suo complesso.

La tesi si articola in otto capitoli (considerando questa parte introduttiva al lavoro come il primo di questi). Nel secondo viene fornita una descrizione della fenomenologia delle colate detritiche con particolare riguardo alle modalità con cui esse si originano ed agli elementi morfologici che caratterizzano una canale da colata. Nel terzo capitolo viene inquadrata l'area di studio sotto il profilo geografico, climatico, geologico, topografico in modo da comprendere meglio i fattori che possono influire l'insacco di questi eventi. Nel quarto sono riportati i principi di funzionamento, le caratteristiche, e le tecniche usate con gli strumenti topografici adottati per i rilievi del canale (*laser scanner* terrestre e aereo, GPS) e le procedure adoperate per l'elaborazione dei medesimi dati al fine di renderli utilizzabili per le analisi successive. Il quinto capitolo descrive i metodi di modellazione 3D per la costruzione e rappresentazione della superficie del terreno (modello digitale del terreno) con particolare attenzione ai metodi di interpolazione a triangolarizzazione (*Triangular Irregular Network*) e a grigliatura (*Natural Neighbour* e *Inverse Distance Weighted*). Il sesto elenca passo per passo tutte le fasi operative di elaborazione e analisi a cui sono stati sottoposti i dati acquisiti dai rilievi LiDAR e GPS. Nel settimo e penultimo capitolo vengono riportati e discussi tutti i risultati ottenuti in questo studio (modelli digitali del terreno, mappe dei volumi, mappe di deposito – erosione, sezioni), cercando di capire la morfologia del canale e le dinamiche connesse tra le variazioni di volume e gli eventi di colate detritiche. Infine nel capitolo conclusivo (ottavo) sono riportati alcune osservazioni sulla metodologia impiegata per questo lavoro, e spunti per future e ulteriori analisi.

2. COLATE DETRITICHE

Le colate detritiche (*debris flow*) sono eventi naturali di confine tra una frana asciutta e un evento di piena: sono costituite da un miscuglio d'acqua e materiale detritico che si propaga verso valle lungo pendii o canali ad elevata pendenza per azione della forza di gravità (D'Agostino, 2014).

Il loro innesco può essere originato dalla mobilitazione per scivolamento di materiale incoerente su versanti montuosi, oppure dalla mobilitazione di accumuli detritici posti sul fondo di torrenti e canali naturali. Il verificarsi di tali fenomeni è legato prevalentemente a eventi di precipitazione breve ed intensa, che danno luogo alla formazione di un elevato deflusso superficiale atto ad una mobilitazione parziale o totale del materiale detritico accumulato sul fondo degli alvei torrentizi. Tali depositi sono generati da precedenti cedimenti spondali per erosione dell'alveo stesso o dall'apporto di materiale franato dai versanti soprastanti. Una colata ha luogo quando i deflussi superficiali riescono a mobilitare il cumulo detritico presente sul fondo del canale, una volta saturato. La formazione di deflusso superficiale è correlata alla maggiore o minore permeabilità del bacino in esame, quindi all'uso del suolo ed alle caratteristiche geologiche e morfologiche dello stesso (Romanel, 2012).

Le colate detritiche rientrano, come tipologia di evento, nel trasporto solido di massa nel quale il movimento dei detriti è originato dalla componente parallela alla direzione della forza di gravità e dalla forza idrodinamica della corrente, ed è sostenuto dallo scambio di quantità di moto tra gli elementi della fase solida; nel trasporto solido ordinario invece, il movimento dei detriti è dovuto alla forza idrodinamica della corrente e sostenuto prevalentemente da essa (Romanel, 2012).

Una colata detritica si distingue dalle altre forme di trasporto solido innescate da deflusso superficiale, e dagli eventi franosi, per il ruolo svolto dall'acqua, la quale forma con il materiale detritico una miscela incoerente il cui comportamento è legato prevalentemente alle caratteristiche granulometriche del materiale detritico ed alla pendenza di fondo del canale. La granulometria della frazione solida influenza in gran parte il comportamento di una colata detritica: granulometrica con una forte presenza di sedimenti a grana fine (sabbia, limo, argilla) favoriscono un comportamento di tipo macro-viscoso, mentre una granulometria uniforme consente ai sedimenti di urtarsi più facilmente tra loro, favorendo un comportamento granulo-inerziale. Altra caratteristica delle colate detritiche è la velocità con cui si propagano verso valle che può raggiungere valori compresi tra 0,5 m/s e 20 m/s (Romanel, 2012).

Una colata detritica si presenta generalmente con un fronte costituito dal materiale più grossolano, seguito dal corpo e dalla coda costituiti da materiale solido presente in dimensione e concentrazione decrescenti all'aumentare della distanza dal fronte (Fig. 2.1).

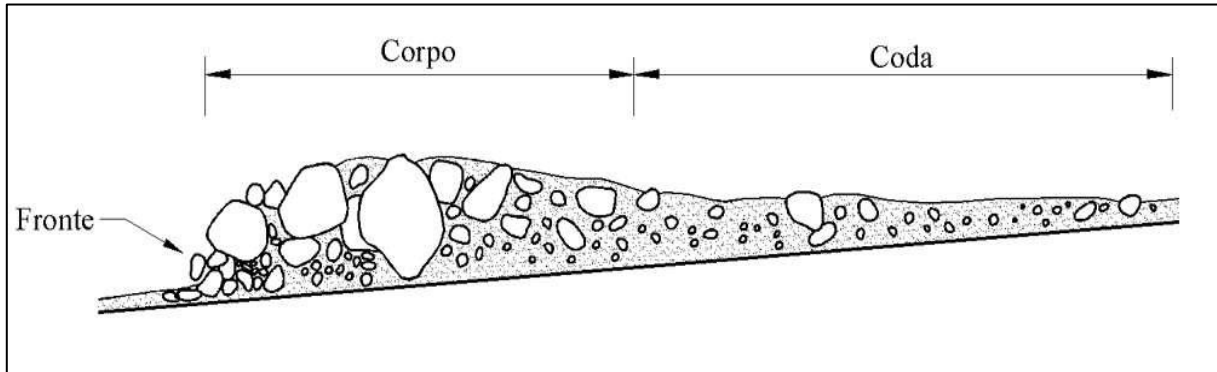


Fig. 2.1: Schema della sezione longitudinale di una colata detritica

Flussi con concentrazioni volumetriche inferiori al 20% sono definiti eventi di trasporto solido di fondo, mentre per parlare di colate detritiche dobbiamo avere valori compresi tra il 25% e il 70%, che corrispondono a una densità variante tra 1400 kg/m^3 e 2530 kg/m^3 . Maggiore è la concentrazione volumetrica, e maggiore è la velocità del flusso di acqua e sedimenti. Inoltre, a differenza delle correnti iperconcentrate ($20\% < \text{Conc.} < 40\%$), i *debris flow* non presentano stratificazioni dei sedimenti. Le colate detritiche presentano una morfologia assai distinta: la lunghezza è generalmente maggiore della larghezza; i rapporti lunghezza/larghezza frequentemente riportati in letteratura si aggirano attorno a 10:1 ma possono arrivare anche a 50:1 e più (D'Agostino, 2014).

Tre sono gli elementi distinguibili nella morfologia di un canale da colata: la zona sorgente o area di innesco, il tratto di trasporto o scavo, il tratto di deposito.

Nella foto che segue (Fig. 2.2) si distinguono nettamente queste tre zone:

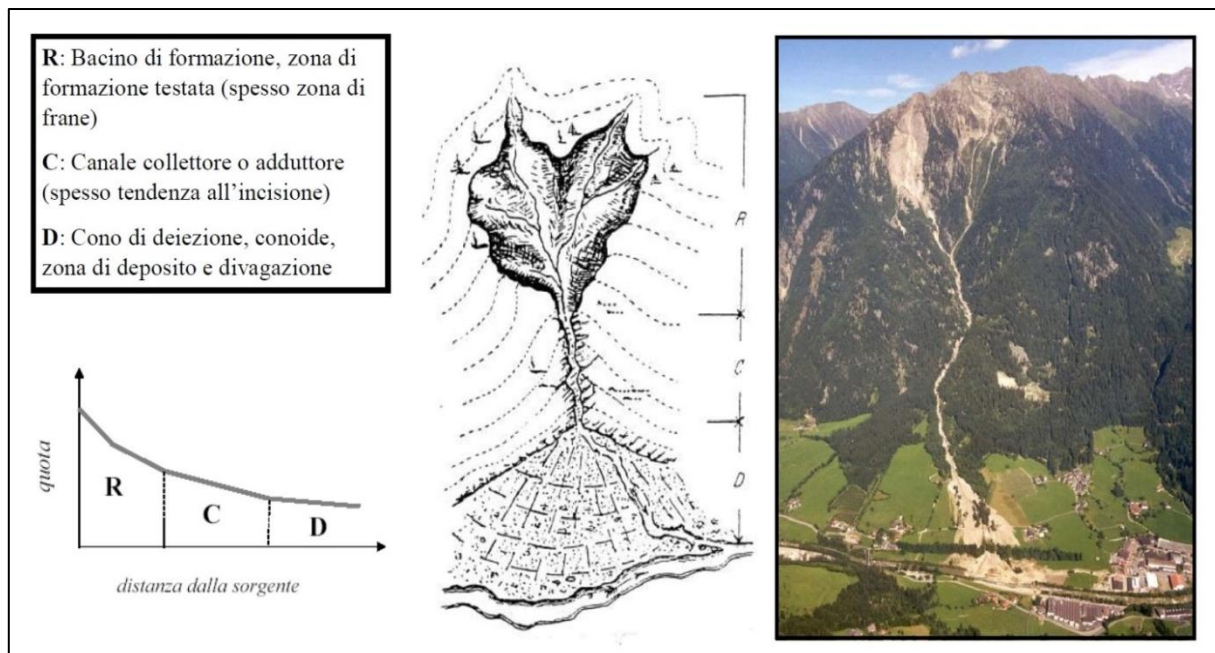


Fig. 2.2: Divisione dei tre tratti di una canale da colata

1. Zona sorgente o area di innesco:

Le zone sorgenti più frequenti sono rappresentate da concavità topografiche o depressioni nella parte alta dei bacini imbriferi montani, caratterizzati da una geometria che favorisce l'accumulo dei detriti e la convergenza del flusso sotterraneo e/o superficiale, necessari a mobilitarli. Nella zona sorgente, la rimozione dei sedimenti domina sulla deposizione; si tratta generalmente di una zona molto pendente, poco o per niente vegetata, con la presenza di detrito sciolto, generalmente costituito da depositi morenici neoglaciali e di falda derivanti dal ritiro dei ghiacciai e dall'alterazione meccanica delle rocce del substrato o delle pareti rocciose sovrastanti (Rosson, 2014).

Un'area d'innesco si può suddividere in due categorie che a loro volta sono distinte in varie tipologie (Rosson, 2014):

Categoria "pendio"

- Tipo 1: è localizzata in un pendio detritico molto pendente e spesso debolmente consolidato. La pendenza varia tra 51% e 78% (27° e 38°);
- Tipo 2: è localizzata nella zona di contatto tra una parete rocciosa e un ripido pendio detritico, con pendenze analoghe al caso precedente. Spesso un deflusso superficiale concentrato si origina in un canale della parete rocciosa e l'acqua, infiltrandosi all'interno della copertura detritica, innesca la colata, provocando un'erosione progressiva.

Categoria “canale”

- Tipo 3: è localizzata in una forra rocciosa occupata da detriti, spesso ricoperti da ghiaccio di alcuni anni prima. La roccia del letto e dei versanti limita l'erosione. Le pendenze variano tra 45% e 70% (24° e 35°);
- Tipo 4: è contraddistinta da mobilitazione improvvisa di vasti e temporanei accumuli di detriti in un canale, a causa dell'aumento di deflusso superficiale. La pendenza varia tra 23% e 65% (13° e 33°);
- Tipo 5: è rappresentata dal collasso di uno sbarramento naturale in una valle (instabilità del rilevato, tracimazione ed asportazione progressiva degli strati superficiali, crolli successivi).

Altre cause dell'innesco di una colata detritica possono essere il sifonamento nell'ammasso detritico o la liquefazione di questo; il collasso di uno sbarramento naturale in alveo rappresenta l'evento più pericoloso tra quelli possibili.

2. *Zona di trasporto o scavo:*

Scendendo verso valle si ha la zona di transizione, dove il flusso ha raggiunto una velocità tale da permettergli di trasportare a valle gli accumuli detritici che incontra. Le “code” di questi eventi di trasporto solido particolarmente intensi però possono rilasciare nell'alveo nuovi depositi di sedimenti che saranno portati a valle da eventi successivi. Nel complesso comunque l'area si contraddistingue per il quasi equilibrio dei processi di erosione con quelli di deposizione. E' costituita da un canale, delimitato o meno da argini laterali naturali, situato sul piano di una valle, in una gola oppure superficialmente su un versante detritico. Nel caso di pendii detritici trattasi molto spesso di canali effimeri, di sezione a forma di “V” o rettangolare, soggetti a cambiamenti ed avulsioni secondo l'entità delle precipitazioni e delle condizioni idrologiche spesso assai mutabili, nei quali il flusso segue normalmente linee di drenaggio preesistenti. (Rosson, 2014).

3. *Zona di deposito:*

Dove la pendenza inizia a diminuire, la zona di trasporto cambia gradualmente in una zona di deposizione. Nella parte alta può essere persino difficile distinguibile le due aree. Gli argini laterali spesso sono formati da depositi detritici che presentano un'elevata acclività e frequentemente mostrano una disposizione granulometrica inversa, con i diametri più grossolani in cima agli argini e diametri piccoli in basso (Romanel, 2012).

Le condizioni predisponenti la formazione di colate detritiche possono essere così riassunte (Romanel, 2012):

1. Presenza di rocce e terreni argilloso-gessosi e tufaceo-marnose, facilmente erodibili e generalmente saturi, ricoperti da una potente coltre di detriti e depositi di fondo;
2. Presenza di sovrascorrimenti tettonici che hanno comportato la formazione di due ampi strati di rocce argillitico-gessose ed intensa tettonizzazione con decremento della resistenza geomeccanica;
3. Presenza di rocce dolomitiche intensamente fratturate, disarticolate, soggette a crolli perché poggianti su un piede costituito da rocce argillose e gessose raibliane;
4. Morfologia particolarmente aspra con forti pendenze che facilitano l'erosione accelerata in rivoli e calanchi e la mobilitazione di franamenti in massa.

3. AREA DI STUDIO

Fiames è una piccola frazione del comune di Cortina d'Ampezzo situata nella parte settentrionale della provincia di Belluno (BL), nella Regione Veneto (Fig. 3.1). L'altitudine media è di 1292 m sul livello del mare (s.l.m.).



Fig.3.1: Inquadramento della provincia di Belluno

La frazione di Fiames sorge a circa 4 km a nord dell'abitato di Cortina, lungo il troncone della strada statale SS 51 "Alemagna" che dalla Conca Ampezzana si dirige verso la Val Pusteria. Il paesaggio è molto differente dal classico panorama ampezzano: Fiames si trova posizionata, infatti, nell'angusta valle scavata dal torrente Boite, stretta fra gli incombenti massicci del Pomagagnon (a est) e della Tofana Terza (a ovest). Di conseguenza quest'area è solitamente più ombrosa, umida e fredda della Valle d'Ampezzo, che si apre con i suoi amplissimi spazi solo un paio di chilometri più a sud (Fig. 3.2).



Fig. 3.2: Localizzazione della frazione di Fiames

3.1 Inquadramento climatico

Il territorio ampezzano è caratterizzato da un'elevata complessità orografica, tale da rendere frequenti le sovrapposizioni tra fattori microclimatici con le caratteristiche dominanti del clima zonale, determinando così localmente, molteplici situazioni ambientali. Sotto il profilo generale, il clima dominante nel territorio di Cortina d'Ampezzo è di tipo alpino, variabile da temperato a freddo, con inverni più o meno rigidi e con estati fresche (Censi, 2013).

3.1.1 Pluviometria

La piovosità di questo territorio è direttamente proporzionale all'altitudine, variando secondo un regime solstiziale, con un massimo estivo e un minimo invernale. Il numero di giorni piovosi è mediamente uno su tre (Censi, 2013).

La precipitazione media annua varia tra i 900 mm e i 1500 mm. Essa si verifica principalmente sotto forma di neve da novembre-dicembre fino ad aprile-maggio e come pioggia nella tarda primavera e in estate. La piovosità raggiunge un massimo in giugno e agosto con una precipitazione media mensile di 120-130 mm (Fig. 3.3) (Genevois *et al.*, 1999).

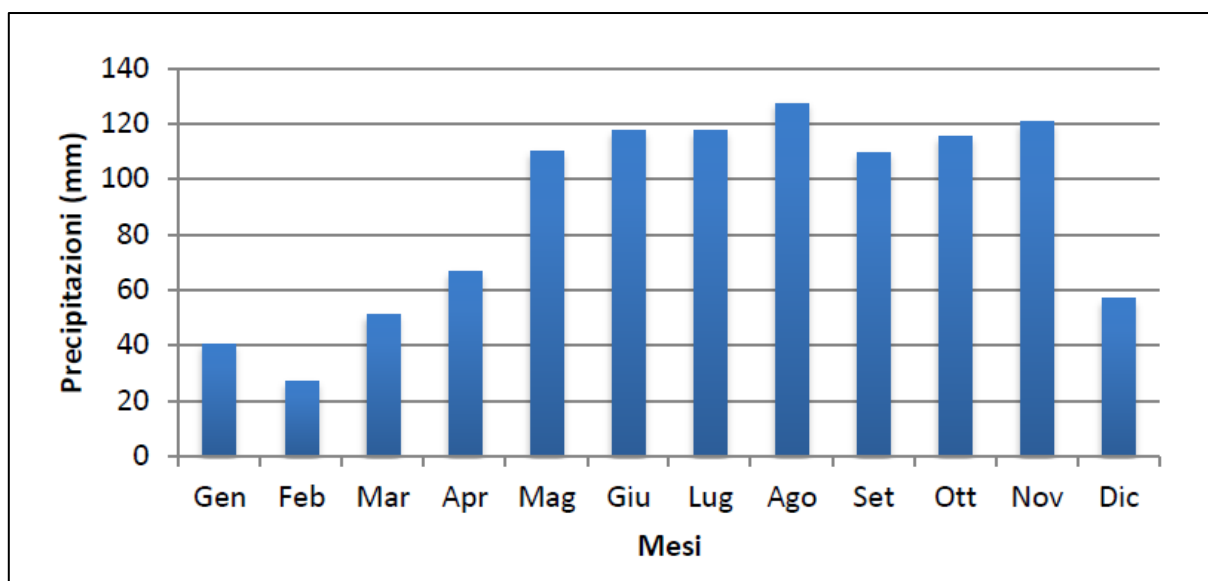


Fig. 3.3: Dati ricavati dal bollettino dei valori pluviometrici medi mensili - Centro Meteorologico di Teolo (ARPAV) - Gilardon (Cortina) nel periodo 1992 – 2011

3.1.2 Termometria

La temperatura media annua è di circa 6,3° C nel fondovalle di Cortina, con un’escursione termica annua di 18,4° C; la media delle massime assolute è di 30° C, mentre la media delle minime assolute è di -19° C. Il numero di giorni in cui la temperatura media supera i 10° C è di 120. I primi geli si riscontrano nel periodo compreso tra l’1 e il 15 ottobre, mentre gli ultimi geli tra l’1 e il 15 maggio (Censi, 2013).

3.1.3 Igrometria

L’umidità relativa dell’aria si mantiene in media attorno al 62 % (min. 58 %, max. 68 %), con relativa costanza.

Le variazioni igrometriche seguono naturalmente un decorso stagionale (massima autunnale, minima estiva), presentando anche normali oscillazioni giornaliere, comunque contenute entro limiti ordinari (Filippi, 1985).

Durante la giornata o in brevi periodi, si possono infine verificare dei crolli igrometrici improvvisi, compresi tra il 30 e il 40 % provocati da correnti del Föhn, vento discendente caldo e secco che spira lungo il lato sottovento di una montagna o catena montuosa.

3.1.4 Ventosità

Il territorio ampezzano è caratterizzato principalmente da venti deboli (con velocità reale da 1 a 14 Km/h), associati a rari fenomeni di venti forti (oltre i 14 Km/h) (Filippi, 1985).

3.1.5 Niviometria

Il periodo d'innervamento sul fondovalle ha inizio a dicembre e prosegue fino a fine marzo, metà aprile. La durata media è di 110 giorni e tale valore tende a crescere con l'altitudine fino a superare gli otto mesi sopra i 2500 m. L'altezza del manto nevoso è mediamente compresa tra i 50 e i 100 cm (Censi, 2013).

3.2 Inquadramento geologico

Il territorio ampezzano è caratterizzato da formazioni geologiche di origine sedimentaria, come la dolomia, che costituisce il nucleo essenziale delle Dolomiti Ampezzane. Sono presenti anche strati calcarei giallastri, arenarie fini e marne facilmente erodibili e causa di evidenti movimenti di massa e colate che interessano la coltre superficiale (Fig.3.4) (Censi, 2013).

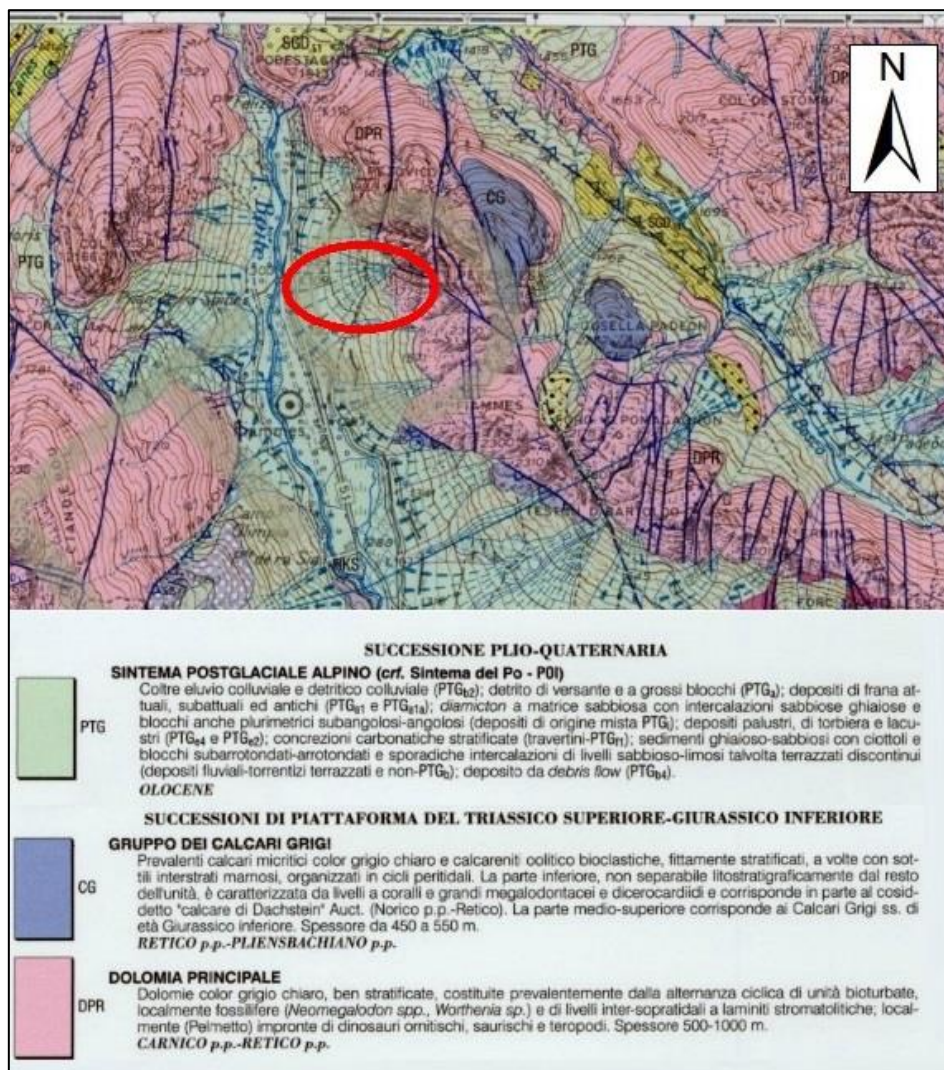


Fig. 3.4: Carta Geologica di Fiemmes; l'area di studio è delimitata in rosso

I suoli che si originano da questi materiali sono in genere ricchi di argilla e relativamente profondi, ma solo a moderata differenziazione per il drenaggio difficoltoso e il conseguente ristagno d'acqua. Le formazioni di Raibl (prevalentemente costituite da marne e argille) tendono a espandersi e a seppellire i substrati circostanti, sotto forma di colate più o meno spesse. I caratteri che predispongono all'evoluzione morfologica possono essere individuati nell'alternanza di rocce a comportamento plastico (siliti e argilliti) e rigido (arenarie, dolomie e calcari) e nella presenza di numerose faglie e sovrascorrimenti, che portano alla suddivisione degli ammassi rocciosi. Il risultato è la combinazione di forme verticali o orizzontali quali torri, guglie, creste, camini, cenge e altopiani (Censi, 2013).

Dal punto di vista geomorfologico siamo in presenza di uno strato di detriti (ghiaioni alle pendici delle pareti dolomitiche) generati dall'alterazione di calcari e dolomie e formato da particelle di varie dimensioni che vanno dalla sabbia fino ai grossi massi. Tale strato risulta inciso da una serie di canali da colata che raggiungono il fondovalle, interessando talvolta sia la pista ciclabile che la SS 51 (Rosson, 2014).

3.3 Il canale "c08" oggetto di studio

I vari canali da colata detritica presenti nell'area di Fiammes, in particolare quelli ai piedi del massiccio del Pomagagnon, sono già da diversi anni oggetto di studio da parte del prof. Carlo Grigoretti dell'Università degli Studi di Padova. Le ricerche connesse a tali canali riguardano lo sviluppo di modelli matematici di previsione della propagazione delle colate detritiche.

Il canale oggetto di questo lavoro di tesi è il n° 8 ("c08") secondo la nomenclatura assegnata dallo stesso prof. Gregoretti.

Questo canale ha origine all'interno di una profonda insenatura nel fianco sud-ovest del massiccio del Pomagagnon, circondata da pareti rocciose verticali costituite da dolomie e calcare del Triassico Superiore e Giurassico Inferiore.

A circa 1650 m s.l.m. proprio dove finiscono le pareti rocciose, un piccolo bacino di drenaggio da origine al canale "c08", il quale si estende incidendo lo strato superficiale dei depositi detritici sottostanti costituiti da sabbia, ghiaia, fino ad arrivare a grossi massi. La pendenza varia tra il 40% e il 50% (Fig. 3.5, 3.6).



Fig. 3.5: Il canale "c08" visto da valle verso monte



Fig. 3.6: Il canale "c08" visto da monte verso valle

A circa 1385 m s.l.m. il canale raggiunge la pista ciclabile “Lunga via delle Dolomiti” che scorre lungo la sede della vecchia ferrovia austro-ungarica che collegava Cortina a Dobbiaco. A valle della pista ciclabile è presente un enorme bacino di deposito costruito a difesa della strada statale SS 51 di Alemagna da eventi di *debris flow* (Fig. 3.7).

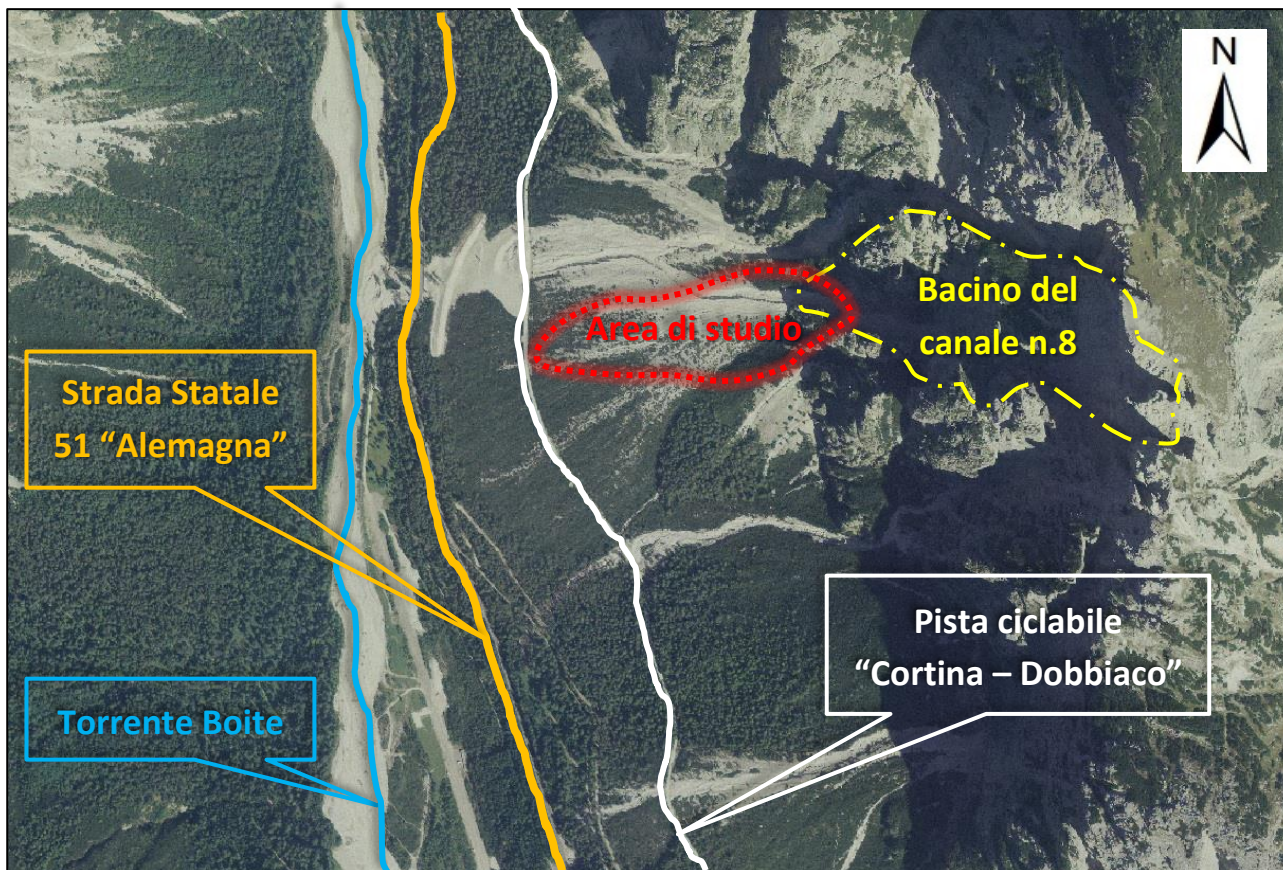


Fig. 3.7: Ortofoto dell'area di studio

La SS 51 corre parallela alla pista ciclabile, ad una distanza di circa 100 m verso valle. Lungo il suo percorso sono dislocate diverse aziende manifatturiere (carpenteria e prodotti in legno), attività di vendita al dettaglio (prodotti sportivi), alcuni uffici (Regole d'Ampezzo e ANAS) e infrastrutture di tipo turistico (un campeggio ed un hotel) e per il tempo libero (centro sportivo di Fiames con un campo di calcio ed uno di atletica) (Rosson, 2014).

3.4 Eventi di debris flow nel periodo di studio

Per inquadrare anche dal punto di vista storico il fenomeno di colate detritiche che interessa l'area del canale "c08" durante il periodo di studio (2006 -2013) è stata fatta una ricerca sui principali eventi dal prof. Grigoretti al fine di comprendere al meglio i cambiamenti morfologici avvenuti.

In ordine cronologico abbiamo 3 eventi avvenuti tutti nel periodo estivo del 2011: 4 luglio 2011 (di sera), inizio agosto 2011, fine agosto 2011.

I dati storici raccolti non riportano altri eventi di *debris flow* durante l'arco temporale di studio, questo però non vuol dire che non ci siano stati fenomeni di altra natura (es. trasporto solido di fondo, crolli di parete rocciosa) che abbiano comportato delle variazioni e ripercussioni all'area in esame. Nel luglio 2013 infatti la parete rocciosa verticale appena fuori dal canalone è stata soggetta ad un significativo fenomeno di crollo parziale che ha riversato nel canale diversi metri cubi di sedimenti (Fig. 3.8).

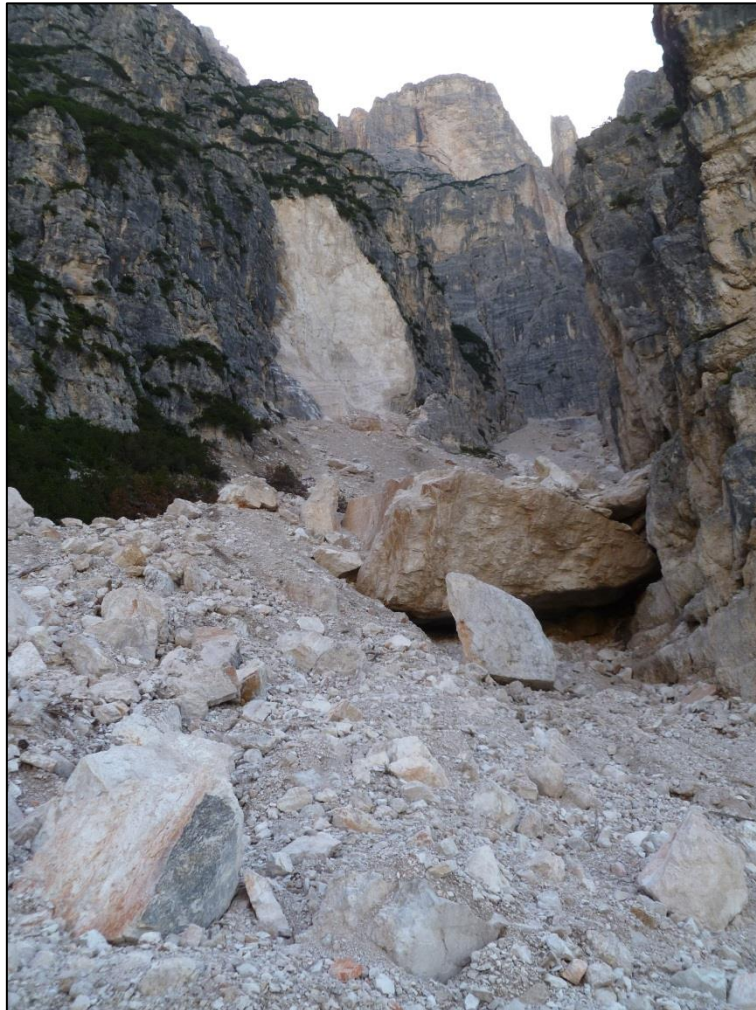


Fig. 3.8: Parete rocciosa crollata nel 2013

4. STRUMENTAZIONE TOPOGRAFICA

In questo studio si è fatto uso di diverse tecnologie e strumenti topografici che hanno permesso di acquisire maggiori informazioni sulla reale superficie del terreno e così ottenere, attraverso l'elaborazione dei dati raccolti, dei risultati più precisi e veritieri. Di seguito vengono descritti brevemente i principi di funzionamento e le caratteristiche di tutte le strumentazioni usate per la realizzazione dei modelli digitali del terreno e la determinazione delle variazioni morfologiche dell'alveo del canale "c08" a Fiames in seguito ad eventi di *debris flow*.

4.1 Laser scanner

Il *laser scanner* rappresenta un nuovo ed efficiente metodo per la digitalizzazione e la modellizzazione di oggetti e di porzioni di territorio aventi qualsiasi forma e dimensione.

La metodo di misura con *laser scanner* sfrutta le onde elettromagnetiche per acquisire coordinate tridimensionali di punti in modo automatico, con elevata densità ed in tempo reale, senza occupare il punto da misurare.

È possibile distinguere:

- Laser Scanner Aereo (ALS - *Airborne Laser Scanning*) basato sulla scansione del territorio sorvolato da un aereo o un elicottero avente un telemetro *laser* che determina la distanza tra il punto di emissione, materializzato dal telemetro, ed il punto di riflessione rappresentato dal generico punto appartenente al terreno (Milan, 2012).

A titolo esemplificativo, considerando una quota di volo di 800 m, con un singolo passaggio un sistema ALS può acquisire dati su una fascia della larghezza di 600 m, con un passo di campionamento, e conseguente risoluzione spaziale, di 15-20 cm e una precisione di circa 10 cm (Baltsavias, 1999).

- Laser Scanner Terrestre (TLS - *Terrestrial Laser Scanning*), in grado di operare sul terreno mediante strumentazione stabile, su posizione fissa o mobile, montata su treppiedi per il rilievo di oggetti vicini da pochi centimetri a un chilometro (Milan, 2012).

Il TLS permette di osservare una superficie alla distanza di 50 m con precisione dell'ordine dei 5-6 mm e risoluzione spaziale di 10-20 mm, variabili in base allo specifico strumento utilizzato (Lichti & Jamtso, 2006). Precisione e risoluzione peggiorano linearmente con la distanza.

I due sistemi applicano lo stesso principio teorico, ma le loro caratteristiche tecniche, le procedure di acquisizione, gli obiettivi delle scansioni e gli approcci per la post-elaborazione dei dati acquisiti sono differenti (Pirotti, 2009).

La diffusione di questa strumentazione ha recenti origini, tuttavia, si è assistito nel corso di questo decennio ad un rapido e crescente sviluppo tecnologico sia della strumentazione stessa che della produzione di *software*.

In modo molto generale è possibile affermare che il *laser scanner* è un dispositivo di acquisizione che restituisce un modello 3D definendo, per ogni punto, un insieme di informazioni che possono riferirsi sia alla posizione nello spazio che alla caratteristica RGB. In particolare, i modelli tridimensionali generati da *laser a scansione* hanno il pregio di riunire in un unico prodotto le caratteristiche geometriche, topologiche e radiometriche di quanto rilevato. La geometria permette infatti di gestire i punti che costituiscono l'oggetto tramite le sue coordinate spaziali senza perdere l'informazione metrica; la topologia consente di legare tra loro le varie componenti geometriche che formano l'oggetto attraverso relazioni di connessione; il contenuto radiometrico permette infine di ottenere informazioni di colore e quindi di definire le caratteristiche dei materiali che compongono l'oggetto. Il rilievo *laser scanning* fornisce come risultato un insieme di coordinate tridimensionali (*point cloud*, nuvola di punti), generalmente misurate rispetto ad un sistema di riferimento interno allo strumento, che rappresentano i punti oggetto colpiti dal raggio *laser*.

4.2 Il raggio laser

Per L.A.S.E.R. (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) si intende un apparecchiatura che trasforma energia da una forma primaria (elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare) in un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata: la luce *laser*. Il *laser* quindi non è altro che una radiazione elettromagnetica, ovvero un'onda luminosa, avente le seguenti caratteristiche:

- Monocromaticità: l'onda dev'essere composta da una sola frequenza di luce, diversamente quindi da quello di una torcia che pur sembrando bianca (o colorata a seconda della lampadina utilizzata) è in realtà composta da molte frequenze appartenenti allo spettro visibile all'occhio umano.

- Coerenza spaziale (o unidirezionalità): l'onda non viene irradiata in tutte le direzioni come nel caso delle sorgenti di tipo tradizionale, ma si propaga a grande distanza e con estrema direzionalità.
- Coerenza temporale: la radiazione luminosa dev'essere costituita da onde della stessa frequenza e della stessa fase che si sommano l'una all'altra originando un treno di luce che può essere spinto ad elevata intensità e ad elevata potenza. In particolare la "potenza" della luce *laser* può giungere a livelli veramente incredibili.

Naturalmente una radiazione luminosa può avere una lunghezza d'onda differente (Fig. 4.1). Nel caso del *laser* la radiazione può essere ultravioletta (avere cioè una lunghezza d'onda compresa tra i 200 e 400 nm), visibile (tra i 400 e i 700 nm) o infrarossa (tra i 700 e i 300 nm) (Bornaz, 2004).

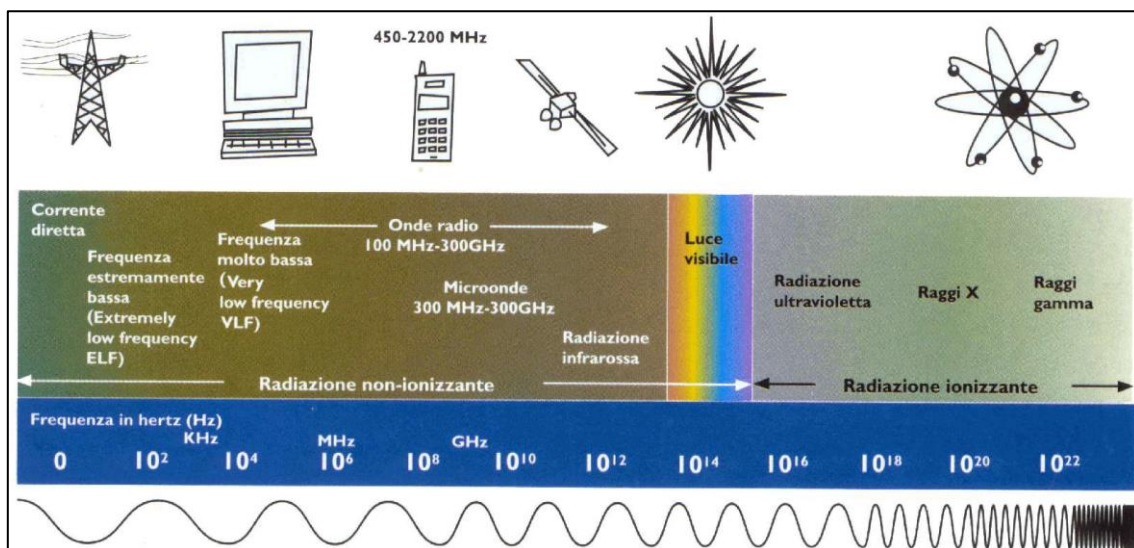


Fig. 4.1: Schematizzazione dello spettro elettromagnetico

4.3 Principi di funzionamento dei laser

I *laser scanner* oggi presenti sul mercato sono molti ed ognuno di essi presenta caratteristiche differenti nel metodo e nella velocità di acquisizione, nella precisione ottenibile, nella portata, ecc. La prima suddivisione che però è possibile effettuare tra i diversi sensori *laser* è quella che distingue gli strumenti a seconda del principio di acquisizione:

- *Laser scanner* distanziometrici
- *Laser scanner* triangolatori

Di seguito vengono trattati questi due metodi, elencando per ognuno i principi di funzionamento e le loro proprietà.

4.3.1 Laser scanner distanziometrici

La misura della posizione tridimensionale del punto avviene in coordinate sferiche attraverso la misura dell'angolo orizzontale (azimutale), dell'angolo verticale (zenitale) e della distanza inclinata (Milan, 2012).

Queste coordinate polari (Fig. 4.2) possono essere poi tranquillamente convertite in coordinate cartesiane (a, y, z) attraverso le seguenti formule:

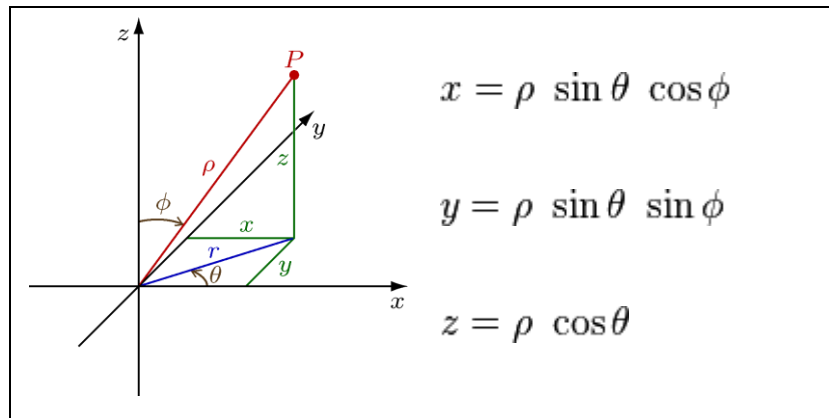


Fig. 4.2: Coordinate sferiche

La distanza dello strumento dall'oggetto è calcolata misurando il tempo di percorrenza di un'onda elettromagnetica del percorso emettitore-oggetto-ricevitore dove emettitore e ricevitore coincidono (Fig.4.3).

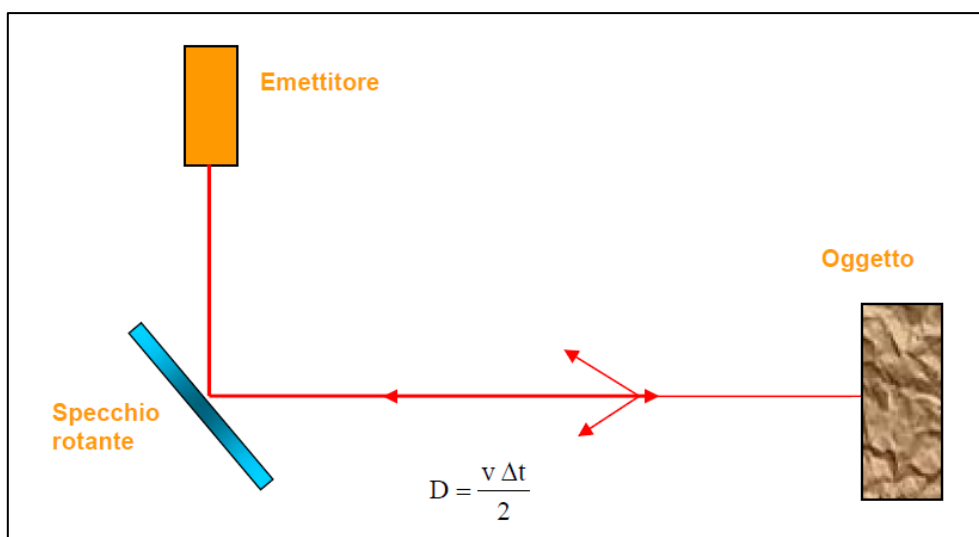


Fig. 4.3: Schema di funzionamento di un laser scanner distanziometrico

Il rilievo si realizza definendo l'area di interesse che si vuole acquisire e la densità di punti desiderata. Definiti questi parametri, l'acquisizione è completamente automatica ed il risultato è

una nuvola di punti molto densa. I *laser scanner* distanziometrici possono, in genere, essere dotati sia di distanziometri *laser* ad impulsi che di distanziometri a misura di fase, consentendo misure veloci con precisioni definite in funzione della distanza (Milan, 2012).

I *laser* distanziometrici esistenti sul mercato possono essere classificati nelle seguenti due categorie:

1. distanziometri ad impulsi, prevedono la misura della distanza attraverso la misura del tempo trascorso tra due impulsi o tra due treni d'onda. In pratica, la misura della distanza D avviene attraverso la misura del tempo Δt impiegato da un impulso per andare dal distanziometro al riflettore e viceversa: $D = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$, avendo indicato con v la velocità della luce (Milan, 2012);
2. distanziometri a misura di fase, prevedono la misura della distanza attraverso la misura dello sfasamento tra l'onda emessa e quella ricevuta (a seconda dello strumento si ottengono precisioni e distanze massime misurabili differenti) (Milan, 2012).

A seconda dello strumento utilizzato si ottengono precisioni e distanze massime misurabili (portata) differenti.

4.3.1.1 Distanziometri ad impulsi (sistemi a tempo di volo)

Tali strumenti si basano sul principio del tempo di volo (TOF, *Time Of Flight*) del raggio *laser*. I distanziometri *laser* sono dotati di un oscillatore stabile di precisione (es. $p = 3 \cdot 10^{-8} \text{s}$) che consente di generare una frequenza f di emissione di una serie di impulsi discreti. A tale frequenza corrisponde una lunghezza d'onda *laser* $\lambda = c / f$. In fase di emissione il diodo *laser* è attraversato per un tempo ristrettissimo (dell'ordine di 12 ns circa) da una forte corrente di 20 ÷ 30 A, a seguito della quale emette un singolo impulso sottoforma di un fascio di luce *laser*. Dopo un intervallo di tempo Δt il segnale di ritorno giunge al ricevitore. Denominato T il periodo della frequenza fondamentale f ($T=1/f$), l'intervallo Δt tra l'istante t_a di invio del segnale e l'istante t_b di ricezione del segnale di ritorno, risulta dato da (1):

$$\Delta t = nT + t_a - t_b \quad (1)$$

Questa formula permette di calcolare il tempo impiegato dall'impulso attraverso la somma algebrica del numero di periodi interi di tempo (nT), compresi tra lo Start (t_a) e lo Stop (t_b), e l'istante di emissione dell'impulso immediatamente successivo. Per misurare con precisione t_a e t_b si utilizza solitamente un convertitore tempo-tensione costituito da un condensatore caricato, per i tempi in oggetto, da una corrente costante. Nota la tensione raggiunta per un tempo di carica

corrispondente al periodo di oscillazione (T), è possibile ricavare per interpolazione i tempi residui richiesti, in funzione della tensione applicata al condensatore. Determinato così il tempo di volo Δt , la distanza D tra il centro strumentale ed il primo punto che il raggio incontra e da cui viene riflesso si ottiene dalla formula (2):

$$D = \frac{v \cdot \Delta t}{2} \quad (2)$$

dove con v viene indicata la velocità della luce ($2,998 \times 10^8$ m/s). La massima distanza operativa per strumenti che operano sul tempo di volo è di alcune centinaia di metri e l'accuratezza nella determinazione delle coordinate varia in genere da alcuni millimetri ad un paio di cm o oltre; essa è migliore per gli scanner che operano per differenza di fase, che però lavorano su distanze più ridotte e con una velocità di acquisizione minore. Oltre alla distanza, per ogni punto viene rilevato anche il suo angolo zenitale α e azimutale β : queste tre misure consentono di determinare per coordinate polari la posizione del punto in questione (Fig. 4.4).

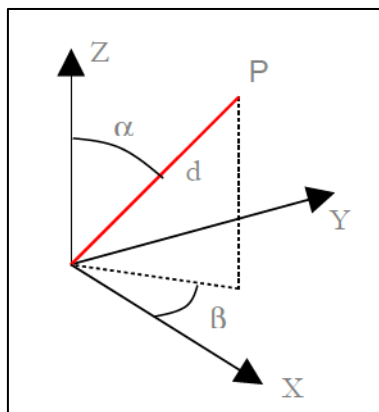


Fig. 4.4: Grandezze misurabili con distanziometri ad impulsi.

Il risultato di queste misure, attraverso poi la conversione da coordinate polari a cartesiane (x, y, z), permette di conoscere la posizione tridimensionale di un gran numero di punti (nuvola di punti o *point cloud*) che descrivono la superficie dell'oggetto osservato. All'utente viene anche fornito per ogni punto un quarto valore che esprime l'intensità di ritorno (il sensore *laser* è in grado di valutare quale sia l'intensità di riflessione dell'oggetto nei confronti del raggio stesso) (Milan, 2012).

4.3.1.2 Distanziometri a misura di fase

In questo tipo di strumentazione il funzionamento si basa sull'emissione di una radiazione ottica, che viene trasmessa e modulata verso un prisma retroriflettore, che ne riverbera una parte verso l'apparecchio ricevente. La misura della distanza compresa tra distanziometro e oggetto viene

calcolata sulla base dello sfasamento esistente tra l'onda emessa e quella ricevente. I distanziometri a misura di fase sono composti da due parti, una trasmittente ed una ricevente. L'esigenza di mantenere concentrata l'energia dell'onda emessa, e quindi di poter riceverne una buona parte, fa sì che si debbano utilizzare lunghezze d'onda molto piccole (infrarosso vicino) (Milan, 2012).

4.3.2 Laser scanner a triangolazione

I *laser scanner* a triangolazione sono strumenti che utilizzano il principio dell'intersezione in avanti. Si tratta di strumenti di forma allungata o a tubo dotati di un diodo emettitore o di un diodo ricevitore posizionati agli estremi dello strumento (Milan, 2012).

Il raggio *laser* emesso dall'emettitore, deflesso secondo un passo incrementale prestabilito, colpisce l'oggetto descrivendo un profilo (*pattern*) di scansione regolare, ed il segnale riflesso (punto o linea *laser*) viene "catturato" da un ricevitore (camera digitale) posto ad una distanza prestabilita e calibrata (base) rispetto alla sorgente di emissione del raggio stesso. In questo modo viene risolto il triangolo emettitore-oggetto-ricevitore (Fig. 4.5)

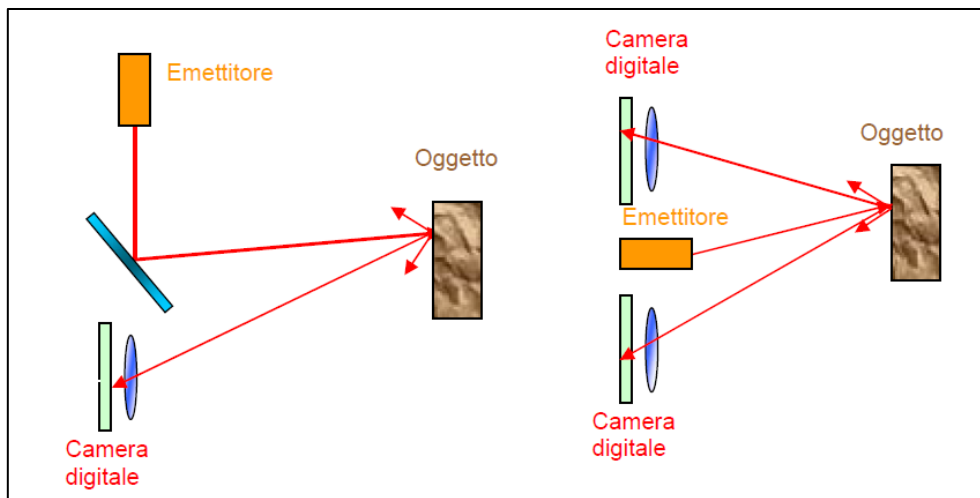


Fig. 4.5: Schema di funzionamento di un laser scanner a triangolazione

Il segmento che unisce i due diodi è chiamato base e la sua dimensione non può superare limiti pratici di maneggevolezza (circa 1 m), con ovvi limiti prestazionali dello strumento. Per la determinazione della posizione del punto acquisito si misura una distanza e due angoli (l'angolo che si forma tra il raggio emesso e la base dello strumento, e l'angolo che si forma tra il raggio riflesso e la base. Tale geometria di acquisizione consente di ottenere precisioni molto elevate (sub-millimetriche) a scapito però di portate limitate (dell'ordine di qualche metro) e tempi di acquisizione mediamente elevati (Milan, 2012).

4.4 Laser scanner aereo

La scansione del territorio con il *laser scanner* distanziometrici avviene sorvolando l'area a bordo di un aereo o un elicottero sul quale è montato un telemetro *laser* che determina la distanza fra il punto di emissione A, materializzato dal telemetro, e il punto di riflessione B, che rappresenta il generico punto appartenente al terreno e colpito dal *laser* (Fig. 4.6).

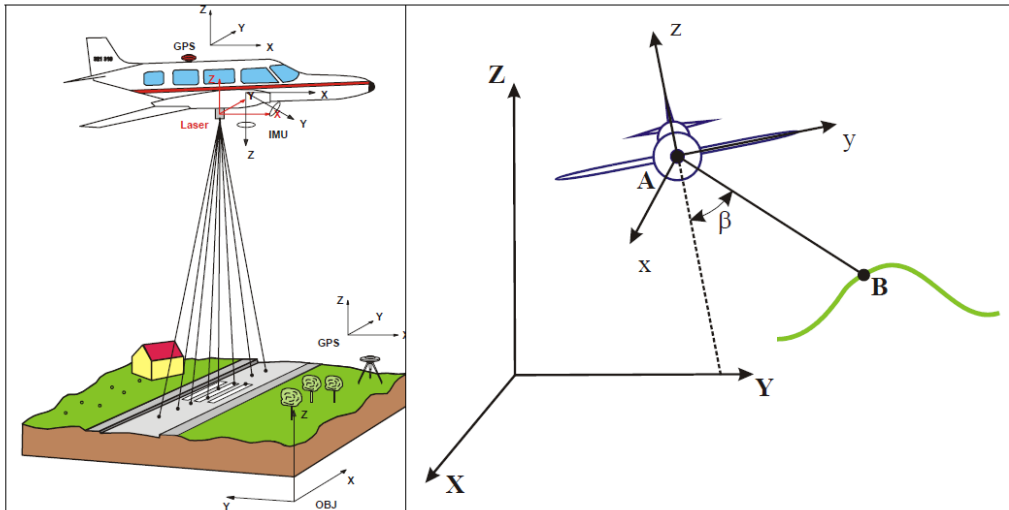


Fig. 4.6: Funzionamento del laser scanning

Il telemetro misura il tempo Δt impiegato dall'impulso *laser* ad eseguire il percorso di andata e ritorno. Lo *scanner laser*, oltre a misurare la distanza fra i punti, ne fornisce anche le coordinate essendo nota, in ogni istante, la posizione e l'assetto del mezzo sul quale il telemetro è montato, grazie ad un sistema integrato GPS/IMU. Il sistema GPS/IMU, infatti, consente di determinare oltre alle coordinate, l'orientamento della retta normale all'aereo. I tre sensori (GPS, IMU, telemetro) sono posizionati in punti diversi del veicolo, per cui è necessario conoscere con precisione la posizione relativa dei centri strumentali delle tre componenti (Fig. 4.7, 4.8).



Fig. 4.7: Esempio di laser scanner da aereo



Fig. 4.8 Esempio di laser scanner da elicottero

Inoltre, sempre i tre sensori, materializzano altrettanti sistemi di riferimento indipendenti ed è necessario pertanto conoscere i parametri delle rototraslazioni spaziali che li legano, in modo da ricondurre le misure in un unico sistema di riferimento. Per far ciò, prima del volo è necessario eseguire un allineamento; in tale fase, ad aeromobile fermo, i sensori sono accesi e registrano, consentendo di determinare la posizione e l'assetto iniziale.

Il volo è effettuato mediante strisciate che ricoprono il territorio (come per la tecnica fotogrammetrica) (Fig. 4.9).

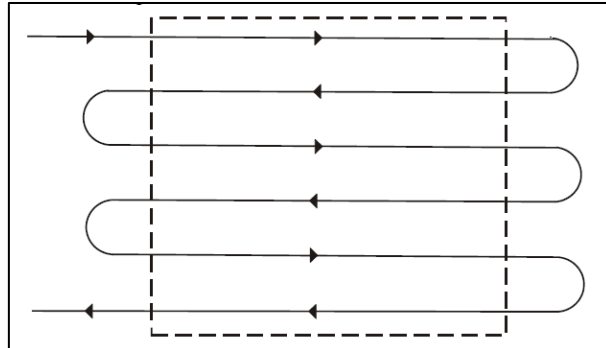


Fig. 4.9: Acquisizione di un terreno, indicato dal tratteggio, mediante strisciate parallele

Durante il moto dell'aereo i sensori acquisiscono i dati autonomamente ma associando, ad ogni misura, un'etichetta temporale data dal GPS, al fine di sincronizzare le varie misure (Milan, 2012). Alla fine del volo, i dati dell'IMU e del GPS sono integrati da un software basato sul filtro di Kalman che calcola la posizione e l'assetto dell'aereo in ogni istante del volo in maniera discreta. Mediante l'interpolazione è possibile ricostruire, come funzione continua nel tempo, l'orientamento del telemetro. Combinando questo con le misure di distanza, si ottengono le coordinate tridimensionali di tutti i punti (*raw data*). Sui *raw data* potrà rendersi necessario il cambio *datum* in funzione delle applicazioni richieste (Milan, 2012).

Durante l'elaborazione dei dati è possibile eseguire delle trasformazioni, quali ad esempio la modifica della struttura (passando da punti sparsi ad un grigliato regolare), il filtraggio (eliminando punti appartenenti ad oggetti non di interesse), l'estrazione di *features* (ad esempio edifici) (Milan, 2012). Mediante la metodologia *laser* è possibile ottenere modelli digitali del terreno (DTM) con elevata precisione, mediante l'applicazione dei suddetti filtri che sono basati su interpolazioni iterative robuste, morfologie matematiche, ecc.

4.5 Laser scanner terrestre

I *laser scanner* terrestri sono l'insieme di strumenti *laser* a scansione che durante le fasi di acquisizione non si trovano installati su un veicolo in movimento. Essi possono operare come strumenti stabili in posizioni fisse per il monitoraggio di movimenti e deformazioni di strutture, il rilievo di alta precisione, oppure come strumenti mobili montati su treppiedi per il rilievo di oggetti "vicini" (da pochi centimetri a 1 km) allo strumento (Fig. 4.10)



Fig.4.10: Esempi di strumenti TLS

Dal punto di vista del principio di funzionamento, i TLS possono acquisire tramite scanner distanziometrici (ad impulso o a misura di fase) e scanner triangolatori.

Poiché la dimensione degli oggetti da rilevare può variare da alcuni millimetri fino ad alcune centinaia di metri non è possibile individuare un tipo di strumento idoneo per ogni evenienza. A questo scopo i *laser scanner* terrestri possono essere suddivisi, in base alla loro portata, in tre grandi categorie:

- *laser* di piccola portata (≤ 1 m);
- *laser* di media portata (1 m ÷ 50 m);
- *laser* di lunga portata (> 50 m).

Nei laser scanner di piccola portata le precisioni possono raggiungere 0,1 mm (e in alcuni casi superare tale limite), mentre nei *laser scanner* di media portata le precisioni possono variare tra 0,2 mm (a distanze di presa non superiori a 2 m) fino a 6 mm alla distanza di 50 m. Nei *laser scanner* di lunga portata le precisioni possono raggiungere i 15 mm per distanze di presa fino a 1000 m.

La scelta del *laser scanner* idoneo per l'applicazione richiesta, oltre alle inderogabili considerazioni circa la precisione e la portata, deve tener conto anche di alcune altre caratteristiche pratico-operative. Grande importanza assumono parametri quali: la velocità di acquisizione, la risoluzione di scansione, la divergenza del raggio *laser*, la reale portata dello strumento (in funzione dei diversi materiali di cui è formato l'oggetto), il campo di misura, l'autonomia operativa, la situazione ambientale (Fig. 4.11), la maneggevolezza, ecc.

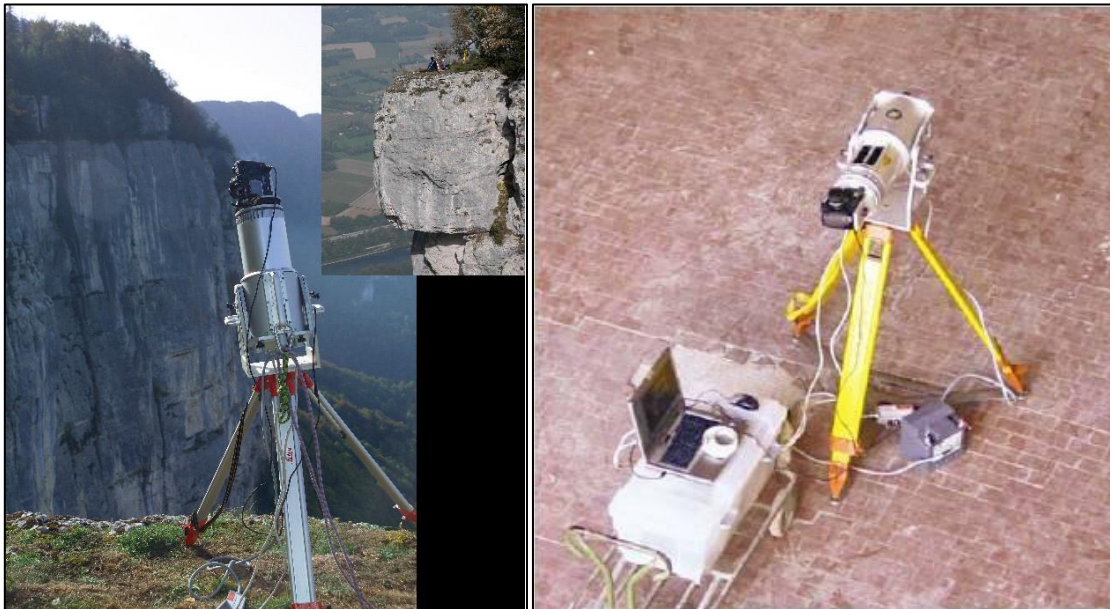


Fig.4.11: Possibili situazioni ambientali nelle quali si può eseguire un rilievo

Anche in presenza di elevate velocità di acquisizione, la scansione di un oggetto complesso può diventare comunque un'operazione onerosa in termini di tempo. Infatti, i tempi di posizionamento dello scanner nelle varie posizioni necessarie per l'acquisizione completa di un oggetto, i tempi di settaggio dello strumento e di analisi "in situ" dei dati acquisiti possono vanificare le maggiori velocità di acquisizione di uno strumento rispetto ad altre tipologie.

Per quanto riguarda la risoluzione di acquisizione essa è teoricamente pari all'ampiezza dell'angolo di rotazione del raggio *laser* tra due punti acquisiti adiacenti. Nel caso di *laser scanner* distanziometrici la distanza misurata può essere considerata come la media delle distanze dei

punti contenuti nell'impronta del raggio *laser* sull'oggetto e anche negli strumenti basati sul principio della triangolazione l'informazione metrica che si ottiene è mediata nell'area di impatto del raggio *laser* sull'oggetto, per cui la risoluzione effettiva dipende anche dalla divergenza del raggio. Se, ad una determinata distanza, l'area di impatto è maggiore della scansione angolare del raggio *laser* stesso, la risoluzione effettiva è pari al diametro medio dell'area d'impatto.

Le portate effettive dei *laser scanner* dipendono dal materiale di cui è costituito l'oggetto. Materiali fortemente assorbenti alla lunghezza d'onda del raggio *laser* impiegato rifletteranno una minore quantità di energia compromettendo la possibilità di misura della distanza nei *laser* distanziometrici o la possibilità di avere immagini automaticamente riconoscibili nei *laser* triangolatori. A parità di materiale costituente l'oggetto, la scabrosità della superficie può ridurre notevolmente la portata del *laser scanner* in quanto aumenta la quantità di energia riflessa in direzioni diverse da quella di ritorno verso lo strumento. Altri fattori non trascurabili nel determinare la portata effettiva di uno strumento *laser scanner* sono la composizione del mezzo nel quale il raggio *laser* si propaga e la presenza di radiazioni di disturbo quali quelle causate dalla riflessione della luce solare, da altre radiazioni artificiali dell'oggetto stesso o di altri oggetti in prossimità dei punti da rilevare. Tutti questi effetti diventano molto importanti specialmente negli strumenti che misurano la distanza mediante la differenza di fase delle onde emesse e riflesse e negli strumenti triangolatori (Rinaudo, 2003).

Per quanto riguarda il campo di misura esistono alcuni scanner fissi (paragonabili ad una camera fotografica) con campi di 0,5 steradiani (la sfera ha un'ampiezza di 4π steradiani), scanner rotanti attorno ad un asse che possono operare in un angolo di $4\div 5$ steradiani e scanner rotanti lungo i due assi principali (*laser scanner* panoramici) che possono operare in uno spazio di circa 11,6 steradiani e in alcuni casi 4π steradiani. I *laser scanner* fissi, solitamente basati sul principio della triangolazione, risultano idonei all'acquisizione di oggetti di limitate estensioni; i *laser scanner* rotanti attorno ad un solo asse sono idonei al rilievo di oggetti estesi in modo preponderante lungo una direzione mentre i *laser scanner* panoramici sono idonei all'acquisizione di oggetti di elevata estensione e per il rilievo di ambienti chiusi (grotte, stanze, ecc.) (Rinaudo, 2003).

Alcuni strumenti *laser* vengono dotati di un *software* di elaborazione delle scansioni che è in grado di riconoscere automaticamente particolari segnali in base alla loro forma o al loro potere di riflessione del raggio *laser* incidente. Questa opportunità consente l'orientamento (registrazione) delle scansioni necessarie al rilievo completo di oggetti estesi o morfologicamente complessi in un unico sistema di riferimento (Rinaudo, 2003).

Nelle applicazioni terrestri, e in particolar modo nell'ambito del rilievo architettonico e urbanistico, sorge spesso la necessità di unire alla descrizione della forma geometrica anche la descrizione materica dell'oggetto stesso. L'immagine fotografica rappresenta senza dubbio la miglior risposta a questa necessità. Alcuni laser scanner terrestri sono già in grado di fornire immagini RGB dell'oggetto rilevato, orientate nello stesso sistema di riferimento adottato per la scansione. Ad oggi la risoluzione di tali immagini è ancora insufficiente per garantire il raggiungimento delle definizioni necessarie alla corretta interpretazione in quanto il pixel di queste immagini coincide con l'area di impatto del laser scanner sull'oggetto che, in molti casi, è di dimensioni superiori ai particolari descrittivi che si vogliono interpretare. Per poter ottenere immagini a maggior risoluzione orientate nello stesso sistema di riferimento utilizzato per la scansione, una possibile soluzione consiste nel montare una camera digitale ad alta risoluzione di orientamento noto rispetto al sistema di riferimento strumentale. In questo modo l'immagine può essere direttamente "spalmata" sul modello di forma generato a partire dalla nuvola di punti acquisiti dal *laser scanner* (Rinaudo, 2003).

Infine occorre considerare la trasportabilità e l'autonomia dello strumento. Sovente è necessario compiere viaggi con mezzi di trasporto diversi dove non è possibile una protezione diretta dello strumento da parte dell'operatore (aereo, nave, ecc.) per cui occorre prediligere strumenti che vengono dotati di contenitori in grado di proteggere meccanicamente e termicamente lo strumento durante il trasporto. Molto più spesso il rilievo avviene in luoghi ove non è disponibile una rete di alimentazione autonoma, per cui si devono prediligere quegli strumenti dotati di batterie in grado di fornire l'autonomia sufficiente per l'intera operazione di rilievo (Rinaudo, 2003).

4.6 La tecnologia LiDAR

Da diversi anni la zona oggetto di studio è interessata da molteplici fenomeni di colate detritiche, perciò l'area è periodicamente monitorata mediante strumentazione LiDAR.

La tecnologia LiDAR (acronimo inglese di *Light Detection and Ranging*) è ormai ampiamente diffusa nelle varie applicazioni legate al rilievo metrico di ambienti naturali e costruiti perché permette, a differenze dei metodi tradizionali, di effettuare misurazioni con maggior precisione e in minor tempo. Per questo studio infatti si sono utilizzati i dati ottenuti da quattro rilievi LiDAR (2006, 2010, 2011, 2013).

Di seguito si riporta, secondo la sequenza temporale, uno schema riassuntivo delle caratteristiche tecniche principali dei quattro voli effettuati con differenti tipologie di strumentazione *laser scanner* e per committenti diversi.

- volo 2006: acquisito per conto del Dipartimento Tesaf dell’Università degli Studi di Padova per scopi di ricerca scientifica relativi alle colate detritiche. Il rilievo è stato svolto nel periodo 21 settembre – 21 ottobre 2006 (Tab. 4.1). I dati di *output* sono stati forniti sottoforma di nuvola di punti x,y,z georeferenziata con una risoluzione del dato *laser* di circa 6 punti al m².

Rilievo LiDAR 2006	
Ditta esecutrice del volo e del rilievo	Helica S.R.L. - Amaro (UD)
Periodo	21 settembre - 21 ottobre 2006
Risoluzione Dato <i>Laser</i>	6 punti al mq
Inquadramento cartografico	Gauss-Boaga (fuso ovest) con quote ellissoidiche
Accuratezza verticale (1 σ)	15 cm
Accuratezza orizzontale (1 σ)	50 cm
Risoluzione foto a terra (GSD, ground sample distance)	15 cm
Overlap tra le strisciate	30%

Tab. 4.1: Specifiche del rilievo LiDAR 2006

- volo 2010: commissionato dalle Regole d’Ampezzo (www.regole.it) ed eseguito dalla LTS Land Technology & Services s.r.l. (www.ltsht.com) a inizio estate 2010 al fine di realizzare e definire un modello numerico del terreno ad alta risoluzione del comune di Cortina d’Ampezzo (BL). I dati della superficie del terreno sono rappresentati sotto forma di curve di livello, cioè linee che uniscono punti di uguale quota, che in questo caso hanno una equidistanza di 1 metro.
- volo 2011: effettuato a novembre per conto dalla Provincia di Belluno (Tab. 4.2), ha come dati *output* una nuvola di punti x,y,z georeferenziata.

Rilievo LiDAR 2011	
Periodo	Novembre 2011
Inquadramento cartografico	Gauss-Boaga ovest con quote ortometriche
Risoluzione dato LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> - 3,8 punti al mq (considerando tutti i ritorni) - 1,2 punti al mq (riguardo la sola superficie del terreno)
Dati DTM e DSM	<ul style="list-style-type: none"> - Formato <i>raster</i> con celle 1x1 m e 2x2 m - coordinate piante UTM-WGS84 - quote ortometriche
Ortofoto in formato:	<ul style="list-style-type: none"> - originale in Jpeg 80 non georeferenziato, - originale in Tiff non geo-referenziato, - formato ECW in coordinate piane UTM-WGS84, - formato Tif + tfw in coordinate piane UTM-WGS84

Tab. 4.2: Specifiche del rilievo LiDAR 2011

- Il rilievo *laser scanner* terrestre (TLS) del 2013 è stato svolto il 6 agosto dal Cirgeo (Centro Interdipartimentale di Ricerca di GEOmatica - www.cirgeo.unipd.it) dell'Università degli Studi di Padova solamente sull'area interessata dal canale "c08" e da una porzione di parete rocciosa verticale appena fuori dal canalone che ha subito dei fenomeni di crollo. I dati della superficie del terreno (punti x,y,z) risultano ancora grezzi, cioè le nuvole di punti acquisite non sono state ancora riportate in un unico sistema di riferimento comune mediante procedura di georeferenziazione.

4.7 Leica C10

Il *laser scanner* utilizzato per il rilievo TLS del 2013 è stato il Leica C10, strumento di rilievo portatile ad impulsi (sistema a tempo di volo) ad altissima velocità di scansione, con compensatore biassiale, lunga portata e campo visivo completo, avente anche fotocamera integrata e piombo *laser* (Fig. 4.12).

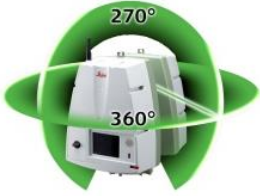


Fig.4.12: Laser Scanner Leica C10

Il Leica ScanStation C10 combina la maneggevolezza di uno scanner “All-in-One” con la possibilità di poter utilizzare target, poligonale, intersezione inversa, o registrazione come stazione libera in base alla logistica dell’area.

Il campo di ripresa di tipo “full dome” (360 ° x 270 °), l’alta precisione, l’ampio raggio di scansione (300 m, con riflettività del 90%) e l’alta velocità di scansione (50k pts /sec), rendono il Leica ScanStation C10 uno degli scanner più versatili del settore. Gli utenti possono usufruire di un *software on-board* semplice, con un controller simile ad una stazione totale, o utilizzare un computer portatile esterno per una più potente visualizzazione ed elaborazione dati.

Vengono riportate di seguito alcune caratteristiche del *laser* a scansione Leica C10 usato per il rilievo del 2013 (Tab 3.3).

Caratteristiche generali laser Leica C10	
Massimo angolo di scansione	Orizzontale: 360° Verticale: 270° 
Portata	300 m con riflettività del 90% 134 m con riflettività del 18% Portata minima: 0,1 m
Precisione delle singole misure	Posizione 3D: 6 mm (1 m ÷ 50 , 1 σ) Distanza: 4 mm (1 m ÷ 50 , 1 σ) Angolo: 60 μ rad (12'')
Tipologia <i>laser</i>	Impulsi
Lunghezza d'onda <i>laser</i>	532 nm (verde visibile)
Classe <i>laser</i>	3R (IEC 60825-1)
Velocità di scansione	Fino a 50000 punti/s (50KHz)
Peso scanner	13,0 Kg, nominale (senza batteria) 13,4 Kg, con batteria interna
Dimensioni scanner (P x L x A)	238 mm x 258 mm x 395 mm
Peso contenitore per trasporto	10,4 Kg (senza <i>laser</i>) 28,0 Kg (con <i>laser</i>)
Video camera ibrida	Cattura in continuo oppure in singoli fotogrammi
Dimensione singola immagine	4 Mpixel (ris. 1920 x 1920 pixel), 17° x 17°
Immagini per panoramica completa	189

Tab. 4.3: Specifiche del laser Leica C10

4.8 Procedura di acquisizione ed elaborazione dei dati

Una delle caratteristiche principali della metodologia *laser scanning* è la dimensione della finestra di acquisizione che lo strumento è in grado di coprire con una singola scansione. Tale dimensione varia da strumento a strumento, e la scelta tra l'uno e l'altro va mediata in funzione della precisione che si vuole ottenere e dell'area che si vuole coprire con una singola scansione. In genere nella fase di acquisizione, lo strumento è in grado di unire singole scansioni fatte da una medesima posizione in un'unica nuvola di punti, in quanto tali scansioni sono riferite allo stesso

sistema di coordinate. Viceversa, se le scansioni sono eseguite da posizioni strumentali diverse, queste risultano essere espresse in sistemi di riferimento distinti; sorge pertanto la necessità di effettuare le acquisizioni in modo da garantire una percentuale minima (30%) di sovrapposizione tra le scansioni affinché possano essere unite a formare un modello unico (Milan, 2012).

In base a tali premesse pertanto è possibile suddividere il processo di modellazione 3D di dati TLS nelle fasi seguenti (Milan, 2012):

- pianificazione della campagna di misure: quante scansioni acquisire, da che punto di vista, con che risoluzione di campionamento, in modo da ottimizzare sia il tempo di acquisizione, e quindi minimizzare il numero di *range map*, sia la copertura della superficie dell'oggetto. L'obiettivo è coprire tutta la superficie con un grado ottimale di sovrapposizione tra coppie di scansioni adiacenti;
- acquisizione: esecuzione delle scansioni dalle varie stazioni di presa definite al passo precedente. Le informazioni di profondità ottenute dal sensore per ogni "vista" dell'oggetto sono spesso arricchite dalle informazioni di colore derivate da una fotocamera digitale generalmente solidale allo strumento stesso;
- allineamento o registrazione delle nuvole di punti: le singole *range map* sono restituite in un sistema di coordinate dipendente dal posizionamento relativo del dispositivo di acquisizione rispetto all'oggetto. La prima fase operativa del processo di post-elaborazione consiste allora nel riportare tutte le *range map* in un sistema di riferimento comune, allineandole tra loro. Questa fase di elaborazione è la più onerosa in termini di tempo di lavoro richiesto;
- fusione: una volta allineate, le *range map* devono essere mosaicate tra loro, con l'obiettivo di ottenere un'unica superficie triangolata priva di lacune;
- editing: nel modello prodotto sono spesso presenti piccole anomalie topologiche o imperfezioni, che devono essere rimosse;
- semplificazione del modello: la scansione restituisce un modello spesso sovra-campionato, ad es. un eccessivo numero di punti rilevati in zone planari dell'oggetto, e comunque in quantità tale da rendere i modelli digitali non direttamente utilizzabili per applicazioni interattive. La semplificazione può ridurre sensibilmente la complessità mantenendo comunque sotto controllo il livello di dettaglio;
- conversione dei dati 3D nel formato richiesto dalla particolare applicazione.

4.8.1 Allineamento

In presenza di un oggetto particolarmente complesso, una sola scansione non è in grado di descriverne il modello completo; è necessario, quindi, pianificare una serie di scansioni effettuate da punti di vista differenti, ognuna delle quali, conserva un proprio sistema di riferimento. L'allineamento è un processo attraverso il quale tutte le nuvole di punti vengono inserite in un unico sistema di riferimento. Questa operazione risulta essere una delle più importanti e delicate in quanto da esse dipende la correttezza metrica del modello finale. Per realizzare l'unione delle nuvole di punti possono essere utilizzate diverse metodologie, a seconda della strategia di rilievo adottata (in campagna) (Milan, 2012).

Più precisamente è possibile eseguire l'allineamento attraverso:

- l'orientamento topografico della stazione *laser*;
- l'utilizzo di targets retro-riflettenti;
- il riconoscimento di punti naturali omologhi in stazioni adiacenti;
- applicazione di tecniche di correlazione.

Nel primo caso si può osservare che sul mercato esistono strumenti in grado di orientare il sistema di riferimento interno operando collegamenti tra le stazioni di acquisizione ed un sistema di riferimento esterno (similmente a quanto accade con una stazione totale). Per far ciò è necessario che ogni punto di stazione *laser* sia definito in un sistema di riferimento e che da ogni stazione sia visibile almeno un altro punto di coordinate note nello stesso sistema. Lo scanner acquisisce la posizione del segnale posto sul punto di coordinate note e si collega al sistema di riferimento esterno. Negli altri due casi è opportuno prevedere una zona di sovrapposizione tra scansioni adiacenti, in modo tale da riconoscere i punti comuni tra queste. Tramite questi punti comuni è possibile determinare i parametri della rototraslazione spaziale, senza variazione di scala, che trasforma i punti della seconda scansione nel sistema di riferimento della prima. La registrazione tra una coppia di scansioni adiacenti comporta quindi il calcolo di parametri indipendenti tra loro: 3 traslazioni nello spazio e 3 rotazioni attorno agli assi coordinati del sistema di coordinate di una delle due scansioni scelta come riferimento.

Note le coordinate modello di almeno quattro punti presenti in ogni scansione, è possibile valutare, attraverso una stima ai minimi quadrati, i sei parametri incogniti della registrazione (Milan, 2012).

L'individuazione di tali punti può avvenire in modo automatico, utilizzando target artificiali retroriflettenti, o in alternativa, individuando punti naturali omologhi in modo manuale.

L'individuazione delle coordinate dei punti corrispondenti nei sistemi locali delle varie scansioni consente di relazionarle tra loro e di assemblarle in un sistema unico formando una sola nuvola di punti. Ciascuno dei metodi proposti presenta vantaggi e svantaggi in relazione alla scena da rilevare ed all'accuratezza richiesta (Milan, 2012).

La registrazione tramite *targets* è la via più semplice impiegata per le fasi di allineamento. Per essa, ogni coppia di nuvole di punti deve contenere minimo 3 targets, automaticamente riconosciuti dal software di processamento dei dati. La loro posizione 3D è computata dapprima, nel rispettivo sistema di coordinate locale e poi, trasformata per calcolare le coordinate assolute. L'accuratezza di tali trasformazioni dipende dalla precisione con la quale i targets sono stati acquisiti e localizzati nelle singole riprese (Milan, 2012).

Se non è possibile pre-segnalizzare i punti, si possono utilizzare tecniche di correlazione tra nuvole di punti. Si tratta di tecniche iterative che cercano punti omologhi in due scansioni adiacenti. La registrazione regolata dall'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*), si basa sulla scelta di coppie di punti corrispondenti e richiede una stima delle posizioni iniziali relative tra due scansioni, generalmente realizzata dall'operatore in modo interattivo (Besl & McKay, 1992).

Basandosi su queste posizioni note, l'algoritmo ricerca per ogni punto (o un subset di punti di controllo), appartenente ad una ripresa, il vertice più vicino ad esso nell'altra e usa questa coppia di punti omologhi per calcolare una nuova posizione relativa tra le scansioni considerate. Questo processo è ripetuto fino a che le distanze tra i vertici scelti non convergano. Questo tipo di algoritmo lavora bene se le riprese contengono aree relativamente grandi di superfici continue ed hanno sufficienti sovrapposizioni. L'algoritmo ICP viene utilizzato non solo nella fase di registrazione a coppie ma anche per allineare globalmente tra loro tutte le scansioni in un unico mosaico (modello 3D). In questo caso l'applicazione contemporanea dell'ICP a tutte le scansioni consente di distribuire uniformemente tra esse l'errore residuo di allineamento migliorando il risultato della mosaicatura rispetto alla procedura basata sull'allineamento sequenziale di singole coppie.

4.9 Il sistema GPS

Accanto alle nuvole di punti derivate dai rilievi ALS e TLS, in questo lavoro di tesi sono stati utilizzati anche i dati ottenuti da una serie di rilievi topografici effettuati con strumentazione di posizionamento globale GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Si tratta in particolare di due diverse tipologie di *dataset*:

- rilievi di sezioni del canale “c08” effettuati nell’agosto 2010 e nel luglio 2011 dal gruppo di ricerca del prof. Carlo Gregoretti del Dipartimento TESAF dell’Università degli Studi di Padova.

Le misure sono state acquisite impiegando ricevitori a doppia costellazione (GPS e GLONASS) a doppia frequenza, secondo il seguente schema di lavoro:

- a. n° 2 ricevitore Topcon “Hiper Pro” (Fig. 4.13) operanti in modalità RTK (*Real Time Kinematic*);
- b. n°1 ricevitore Topcon “GRS-1” (Fig. 4.14) operante in modalità NRTK (*Network RTK*).

L’obiettivo di questi rilievi era quello di effettuare delle comparazioni tra le sezioni GNSS e quelle estratte dai vari DTM LiDAR-ALS in corrispondenza delle medesime posizioni.

- misure del centro di alcuni *target* retroriflettenti, effettuate nell’agosto 2013 contemporaneamente ai rilievi *laser scanner* terrestre.

Queste misure sono state acquisite dal gruppo di ricerca del CIRGEO (prof. Guarnieri) in modalità statica, utilizzando due ricevitori Topcom “Hiper Pro” nella configurazione base-rover. I dati così ottenuti (coordinate x,y,z dei centri dei *target laser*) sono stati utilizzati per georeferenziare le stazioni del TLS Leica C10 nello stesso sistema di riferimento dei dati LiDAR-ALS (Gauss-Boaga fuso Ovest) e poter quindi sovrapporre correttamente tra loro i vari *dataset*.



Fig. 4.13: Ricevitore Topcon “Hiper Pro”



Fig. 4.14: Ricevitore Topcon "GRS-1" con antenna GNSS "PGA-1"

Il sistema GPS, la cui denominazione completa è NAVSTAR-GPS (*Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*), è un sistema satellitare che fornisce informazioni di tempo, distanza e posizione ovunque nel mondo, in ogni istante e con qualsiasi condizione climatica. Creato inizialmente per scopi militari (fu sviluppato a partire dal 1973 dal Dipartimento della Difesa Statunitense), è stato successivamente impiegato anche in campo civile, in particolare nei rilievi topografici e geodetici.

Il sistema si compone di tre sezioni principali: *space segment*, *control segment* e *user segment* (Fig. 4.15) (CIRGEO, 2011):

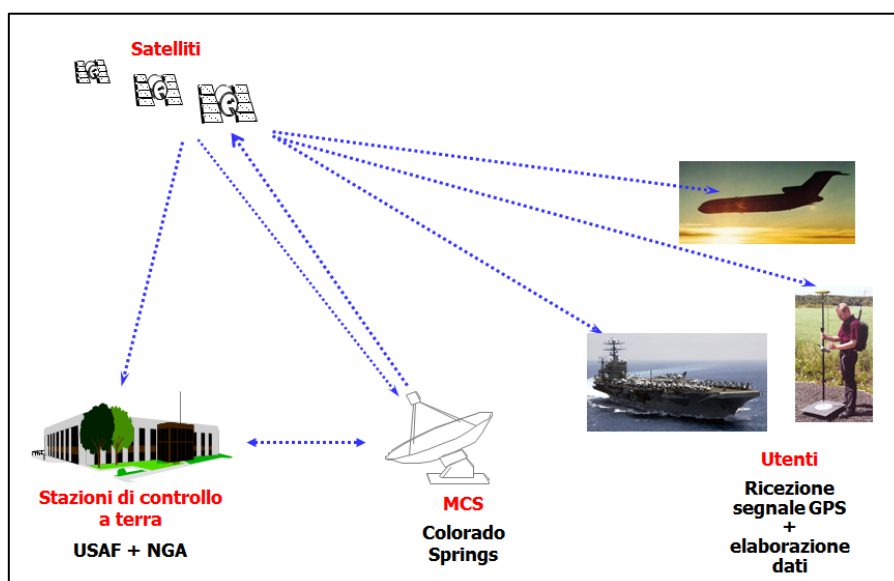


Fig. 4.15: Interazione tra i diversi segmenti GPS

– **Segmento spaziale:**

E' caratterizzato da 24 satelliti disposti su 6 piani orbitali, inclinazione di 55° rispetto all'equatore, altezza da terra di 20200 km e periodo di rivoluzione orbitale di circa 12 ore (Fig. 4.16)

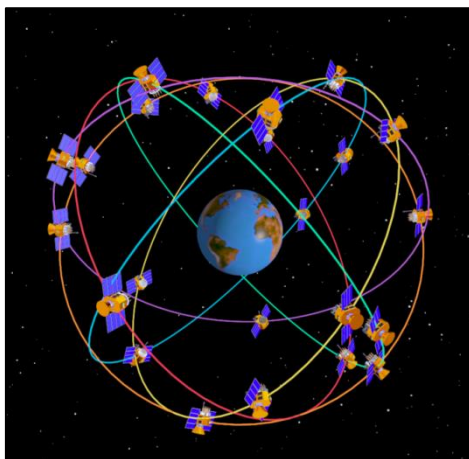


Fig. 4.16: Rappresentazione del segmento spaziale

Tale configurazione consente di disporre di almeno 4 satelliti in qualunque parte del globo 24 ore al giorno, infatti, maggiore è il numero di satelliti agganciati, tanto più precise sono le misure ottenute. Attualmente si possono osservare, in media, 6-8 satelliti GPS (o più); indicativamente ciascun satellite rimane in vista per un periodo di 1- 4 ore.

– **Segmento di controllo:**

E' costituito dal centro di controllo (Master Control Station, MCS) situato presso la Falcon Air Base a Colorado Springs e gestito dallo USAF Space Command. A questo si aggiungono quattro stazioni di controllo (Monitor Station, MS) installate rispettivamente presso le isole Hawaii, la base di Diego Garcia, l'isola di Ascensione e l'atollo di Kwajalein ed altre sei stazioni operative dal 2005.

Le funzioni di queste stazioni sono di:

- aggiornare l'almanacco (insieme di parametri orbitali usati per calcolare la posizione e la velocità approssimata dei satelliti ad un'epoca specifica);
- determinare la posizione dei satelliti nello spazio;
- controllare lo stato operativo della costellazione;
- calcolare la correzione del tempo GPS;
- correggere le orbite dei satelliti.

– **Segmento utente:**

- E' costituito dagli utenti civili e militari dotati di:
- antenne capaci di captare i segnali inviati dai satelliti;

- ricevitori aventi lo scopo di analizzare i segnali, effettuare calcoli e misure e memorizzare i dati;
- *software* e *computer* in grado di elaborare i dati raccolti e pervenire alla determinazione delle coordinate dei punti incogniti.

Le misure GPS sono affette da un notevole numero di errori di diversa tipologia, legati a varie cause. Possiamo avere infatti diversi tipi di fattori che influenzano la precisione del posizionamento satellitare, e che possono portare ai seguenti tipi di errore:

- **Errori strumentali:** derivanti dalle modalità di funzionamento dei satelliti e dei ricevitori (sfasamento orologi dei satelliti, errore orologio del ricevitore, stato di cattiva “salute” del satellite, “Rumore” del ricevitore; ecc.);
- **Errori del modello:** errori di tipo sistematico (indeterminazione dell’orbita dei satelliti, errori di sincronismo degli orologi dei ricevitori e dei satelliti, perturbazione del segnale nella propagazione attraverso l’atmosfera, ecc.);
- **Errori di osservazione:** errori accidentali che si verificano nell’acquisizione del segnale da parte del ricevitore, come ad esempio:
 1. *Cycle slips* (salti di ciclo): sono interruzioni della ricezione del segnale proveniente dal satellite durante una sessione di misura; sono dovuti all’elevata rumorosità del segnale o ad una temporanea ostruzione della linea di vista ricevitore-satellite. Durante una sessione di osservazione, fintanto che le onde portanti sono ricevute senza interruzioni, si genera una sola ambiguità incognita per ogni coppia ricevitore-satellite. Nel caso si verifichi un’interruzione nella ricezione della fase, al momento del “riaggancio” del segnale la parte frazionaria della misura di fase è uguale a quella che si sarebbe ottenuta se non vi fosse stata la discontinuità ma il numero intero di cicli, intercorsi tra l’inizio e la fine dell’interruzione, viene perso; proprio questo numero intero di cicli rappresenta l’entità del *cycle slip*.
 2. *Multipath*: è un fenomeno che peggiora il rapporto segnale/rumore, riconducibile dalla contemporanea ricezione sia del segnale proveniente direttamente dal satellite che di altri segnali riflessi da superfici circostanti l’antenna GPS (alberi, edifici, cartelli, masse metalliche, tralicci, ecc.). Occorre pertanto avere cura di collocare la stazione lontano da superfici riflettenti il segnale (Fig. 4.17).

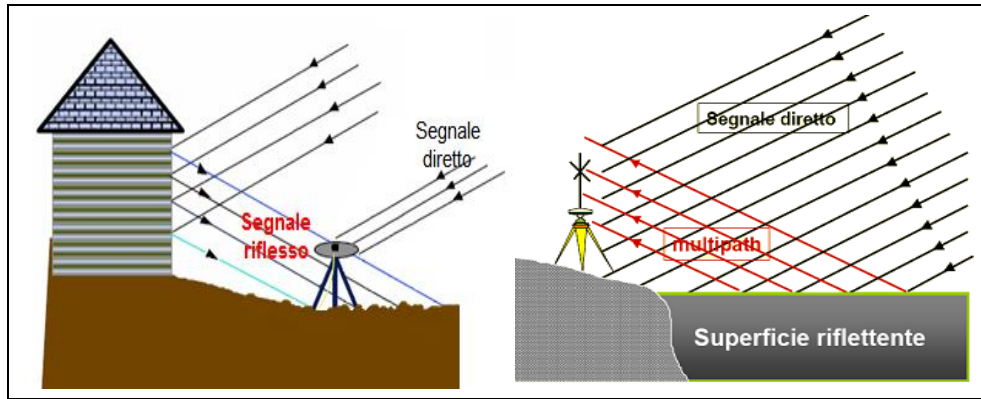


Fig. 4.17: Esempi di multipath

3. Variazione del centro di fase dell'antenna: è riconducibile alla circostanza che le antenne non sono in grado di ricevere i segnali in modo perfettamente isotropo sia rispetto alla direzione azimutale che a quella zenitale; infatti, uno stesso segnale, ricevuto da due antenne uguali ma orientate diversamente, genera misure diverse.

Di seguito si fornisce una descrizione sommaria del funzionamento dei sistemi di posizionamento globale GPS e GLONASS e delle modalità operative adottate nel corso dei rilievi del 2010, 2011 e 2013.

4.9.1 Modalità operative

I dispositivi GNSS possono essere utilizzati secondo diverse modalità operative. In particolare, per quanto riguarda le applicazioni topografiche, nelle quali sono richieste precisioni almeno centimetriche, si possono distinguere 2 principali categorie di misura:

- modalità statica, differenziale post-processato
- modalità tempo reale

Entrambe richiedono l'impiego di almeno 2 ricevitori operanti simultaneamente, i risultati delle misure (coordinate dei punti battuti) sono però ottenuti secondo procedure di calcolo differenti.

Nel primo caso (modalità statica) entrambi i ricevitori (*master* e *rover*) vengono posizionati su treppiedi: l'unità *master* su un punto di coordinate note a priori, sul quale stazionerà per tutto il tempo del rilievo, mentre l'unità *rover* andrà ad occupare di volta in volta i punti di coordinate incognite (cioè da rilevare ex-novo).

Durante il rilievo le due unità operano indipendentemente l'una dall'altra, ovvero senza alcun tipo di collegamento radio tra esse. In pratica ciascuna "ignora" la presenza dell'altra.

Affinché il rilievo abbia successo, ossia sia possibile determinare con la precisione richiesta le coordinate x,y,z delle posizioni via via occupate dal ricevitore *rover*, è necessario che le due unità

acquisiscano dati (misure di distanza ricevitore-satellite) da 4 o più satelliti contemporaneamente. Tale condizione richiede che *master* e *rover* operino all'interno della medesima finestra temporale di osservazione con lo stesso rateo di acquisizione (intervallo tra due istanti consecutivi di archiviazione delle misure nella memoria interna).

Il tempo di stazionamento sui punti occupati da *master* e *rover* (tempo di osservazione) dipendono da vari fattori:

- disponibilità di satelliti in vista
- precisione richiesta per il rilievo
- lunghezza della *baseline*, ovvero del vettore che virtualmente congiunge la posizione occupata simultaneamente in campagna dai due ricevitori.

In linea generale maggiore è il tempo di volo di osservazione della *baseline* e potenzialmente maggiore sarà la precisione conseguibile.

Le coordinate corrette delle posizioni su cui ha stazionato l'unità *rover* e le relative precisioni vengono poi calcolate in un secondo momento, in ufficio, a rilievo terminato.

Tramite uno specifico *software* di post-elaborazione, una volta inseriti nel progetto e parametri del rilievo (*files* delle osservazioni di *master* e *rover*, altezze delle antenne, coordinate dell'unità *master*) processando le singole *baseline* separatamente è possibile pervenire alle coordinate finali dei punti occupati dal ricevitore *rover*.

Questa procedura di rilievo consente di ridurre notevolmente gli errori sulle misure del *rover*, dovute principalmente agli effetti di disturbo dell'atmosfera (in particolare ionosfera e troposfera). Con tempi di stazionamento molto lunghi (almeno ore o addirittura giorni interi) su distanze di alcuni km (<10 km) si possono raggiungere accuratezze anche dell'ordine del mm. Si tratta comunque di valori utili per applicazioni geodetiche di alta e altissima precisione.

La seconda modalità (tempo reale) opera anch'essa simultaneamente al caso statico, ma con la differenza sostanziale che le coordinate corrette delle posizioni occupate dall'unità *rover* sono attenute direttamente in campagna grazie ad un collegamento radio tra le due unità, che dev'essere mantenuto costantemente attivo.

Operativamente, il posizionamento in tempo reale si svolge nel modo seguente:

1. Si colloca un ricevitore GPS su una stazione di posizione nota (*master*) e si iniziano le osservazioni;
2. Per ogni epoca di osservazione la stazione *master* calcola la propria posizione e la confronta con quella nota a priori;

3. La differenza tra la posizione nota e quella calcolata viene attribuita agli errori di misura;
4. La stima di tali errori viene quindi comunicata (via radio, modem GSM o Internet) al ricevitore *rover* che sta osservando gli stessi satelliti, in una posizione incognita;
5. L'unità *rover* utilizza le proprie misure di distanza SV-Rc per effettuare un primo calcolo prossimato della propria posizione; quindi corregge tale calcolo con i termini di errore comunicatigli dal ricevitore *master*.

Il vantaggio di questa procedura risiede non solo nella possibilità di acquisire coordinate corrette in tempo reale, ma anche di poter valutare direttamente in campagna la bontà del rilievo che si sta eseguendo e le condizioni di funzionamento dell'unità *master*.

Queste ultime condizioni, nel caso statico, possono essere verificate solo a posteriori, al termine delle operazioni di misura. Lo svantaggio principale del metodo risiede principalmente nella disponibilità di un collegamento radio costante tra i 2 ricevitori e dalla qualità della configurazione della geometria satellitare presente al momento della misura sul *rover*.

Quest'ultima informazione è anch'essa calcolata in tempo reale (RT) e fornita all'utente sul *display* del *controller* attraverso alcuni parametri adimensionali che esprimono la qualità del posizionamento RT:

- HDOP: indica la precisione ottenuta in planimetria,
- VDOP: indica la precisione ottenuta in altimetria
- PDOP: indica la precisione ottenuta nel posizionamento complessivo nello spazio 3D ($PDOP = \sqrt{HDOP^2 + VDOP^2}$).

Oggi giorno, considerando l'elevato numero di satelliti che compongono il sistema americano GPS ed quello russo GLONASS, è abbastanza comune effettuare dei rilievi topografici con valori molto bassi di PDOP, generalmente inferiori a 3-4.

L'influenza della geometria satellitare sulla qualità di un rilievo GNSS tende ad aumentare al diminuire del tempo di stazionamento sul punto. Questo fattore risulta quindi più importante nella procedura in RT piuttosto che in modalità statica, dato che il tempo di osservazione nel primo caso sono molto ridotti, tipicamente alcuni secondi al massimo.

Ciò nonostante, operando con ricevitori a doppia frequenza è possibile raggiungere precisioni centimetriche. Viceversa, qualora si utilizzino dispositivi monofrequenza, la mancanza di informazioni sulla seconda frequenza portante limita le precisioni conseguibili, nelle migliori

condizioni operative, a valori dell'ordine di alcuni decimetri, comunque sufficienti per applicazioni GIS.

In considerazione delle diverse precisioni conseguibili in funzione della tipologia di ricevitore a disposizione, i rilievi in tempo reale possono essere distinti in due macro categorie:

- RTK (*Real Time Kinematic*) per ricevitori a doppia frequenza;
- DGPS (*Differential Global Positioning System*) per ricevitori monofrequenza.

In entrambi i casi l'unità *rover* viene tipicamente posta su un'asta, anziché un treppiede, e va ad occupare più o meno rapidamente la posizione da misurare. Si parla in tal senso di modalità cinematica.

A seconda del tempo di stazionamento sul punto indipendentemente dal ricevitore *rover* impiegato si distinguono due modalità di rilievo:

- *Stop & Go*, nel corso del quale l'unità *rover* staziona alcuni secondi sul punto e poi si sposta sul quello successivo;
- Cinematico continuo, l'unità *rover* si sposta continuamente occupando ogni posizione solamente per un istante (1 secondo).

La modalità RTK è quella attualmente più apprezzata presso i professionisti, grazie alle sue caratteristiche di precisione centimetrica (utile per applicazioni catastali) ed alla possibilità di controllo della qualità del rilievo in campagna.

Lo svantaggio principale di questa tecnica è dato dalla distanza massima (<15 km) che dev'essere mantenuta tra *master* e *rover* per poter operare con precisione centimetriche. Di fatto tale fattore costituisce un limite all'estensione dell'area su cui l'utente professionista può lavorare senza dover spostare di tanto in tanto la stazione master su un nuovo punto di coordinate note (operazione non sempre agevole da compiere).

D'altra parte negli anni recenti, la disponibilità sul territorio di un numero via via crescente di stazioni GNSS opportunamente monumentate e attive 24/7 (stazioni permanenti) e lo sviluppo degli algoritmi di calcolo implementati nei *firmware* dei ricevitori di sviluppare ulteriormente la tecnica di rilievo in tempo reale.

In particolare è stato possibile realizzare delle reti di stazioni permanenti (SP) all'interno delle quali le varie stazioni componenti funzionano in modo cooperativo, inviando le proprie coordinate (CdC) che sovrintende alla gestione dell'intera infrastruttura. Il CdC elabora i dati delle SP determinando per ognuna di esse le coordinate di posizione con precisione del mm. Tale centro inoltre, sulla base delle misure della SP, elabora anche dei modelli di correzione atmosferica. Questo insieme di

informazioni viene reso disponibile in tempo reale agli utenti abilitati, realizzando così un servizio di correzione differenziale in RT, meglio noto con l'acronimo di NRTK (*Network RTK*) (Fig. 4.18).

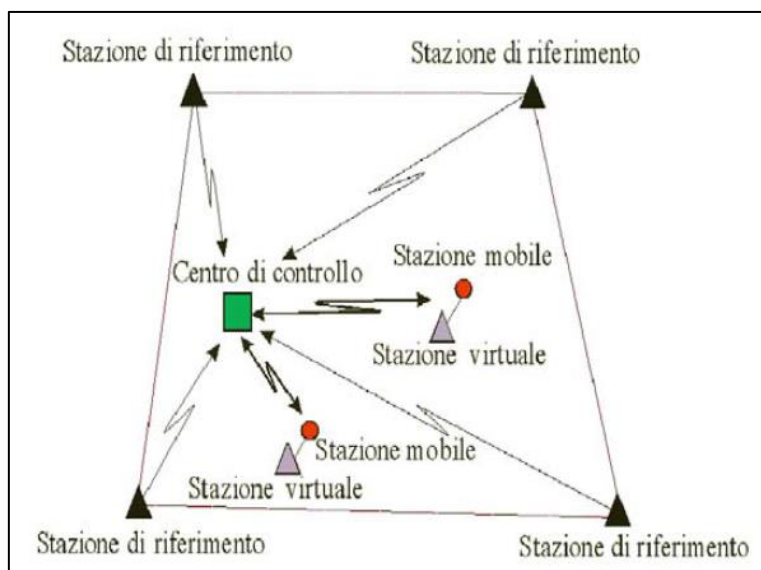


Fig. 4.18: Esempio di una rete NRTK

Il vantaggio di questa soluzione consiste principalmente nell'abilitare l'utente ad operare con un unico ricevitore, in modalità RTK o DGPS, ad una distanza superiore ai 15 km – 20 km e mantenendo un'omogeneità nella accuratezza del rilievo (centimetri – decimetri) su tutta l'area coperta dal servizio del CdC

L'operatore non deve più preoccuparsi della distanza dalla stazione master più vicina (in questo caso una SP), potendo quindi trovarsi anche a 60 km dalla propria unità rover.

Affinché l'unità rover possa utilizzare questo servizio è necessario che il suo *firmware* sia predisposto per ricevere correzioni in tempo reale dal CdC attraverso un collegamento telefonico (tipicamente in modalità GSM – GPRS) ad un indirizzo IP-Internet assegnato al CdC stesso.

Naturalmente qualora la connessione telefonica viene a mancare, il rover passa automaticamente ad operare in modalità "stand-alone", cioè senza alcuna informazione di correzione e quindi con precisioni dell'ordine del metro.

Attualmente nel nostro paese esistono molteplici servizi NRTK gestiti sia a livello regionale da enti pubblici (es. rete GPS della Regione Veneto) sia a livello nazionale (es. rete ItalPoS di Leica e rete NetGEO di Geotop).

5. I MODELLI DIGITALI DEL TERRENO

La nuvola di punti ottenuta con strumentazione *laser scanner*, dopo aver subito l'opportuna georeferenziazione ed infine la registrazione globale, può ora essere utilizzata per ricavare dei modelli digitali della superficie (DSM, *Digital Surface Model*) o del terreno (DTM, *Digital Terrain Model*) di altissima risoluzione (Fig. 5.1)



Fig. 5.1: Superficie considerata in un DSM contro superficie considerata in un DTM.

La costruzione classica di un modello digitale del terreno avviene con procedimenti interpolativi locali, cioè con il metodo agli elementi finiti. Questi possono distinguersi in:

- metodo di triangolarizzazione, dove l'interpolazione avviene mediante piani, su punti comunque disposti collegati fra loro in modo tale da formare una maglia irregolare di triangoli (*Triangular Irregular Network* - TIN) che non abbiano in comune elementi di area;
- metodo di grigliatura, nella quale l'interpolazione viene applicata ad una serie di punti disposti su una griglia regolare (Grid o formato *raster*), utilizzando funzioni bilineari, in particolare paraboloidi iperbolici raccordati fra loro in modo tale da garantire la continuità della superficie (Tonini, 2006). L'area geografica analizzata viene così rappresentata mediante una griglia regolare suddivisa in tante piccole celle (*grid cell* o *pixel*) di ugual dimensione.

In figura 5.2 è illustrato un esempio di confronto tra modello TIN e modello *raster* (Grid).

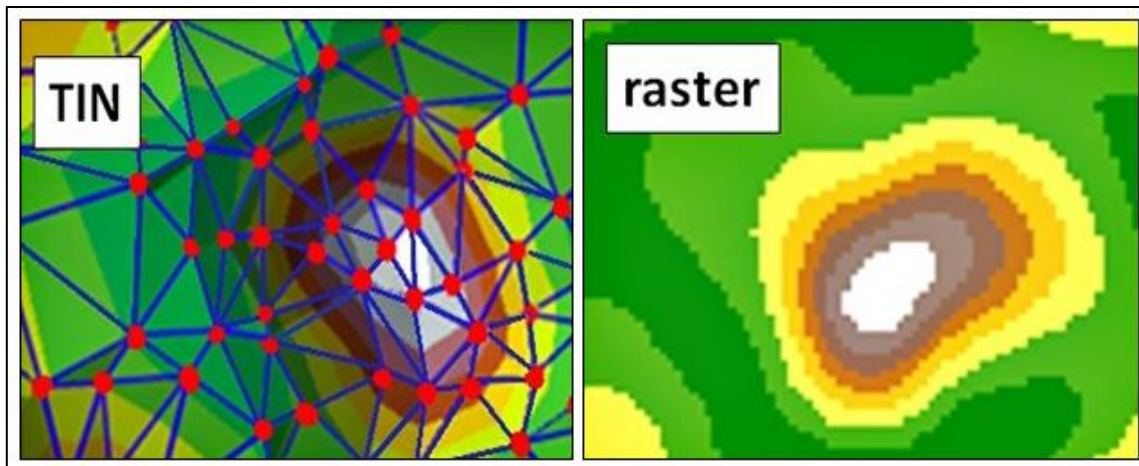


Fig. 5.2: Confronto tra un Tin (a sinistra) e un raster (a destra)

Nei sottoparagrafi successivi si riporta una breve descrizione dei due metodi di interpolazione locale citati.

5.1 TIN

Il *Triangular Irregular Network* è un modello dati comunemente impiegato per rappresentare una superficie continua come quella topografica. Esso permette di generare, rappresentare e analizzare efficientemente modelli digitali del terreno. Un TIN rappresenta una superficie attraverso una serie di triangoli che si appoggiano a dei vertici o nodi che costituiscono i dati di input o sono da essi direttamente desunti attraverso un primo processo di interpolazione (Fig. 5.3) (Tonini, 2006).

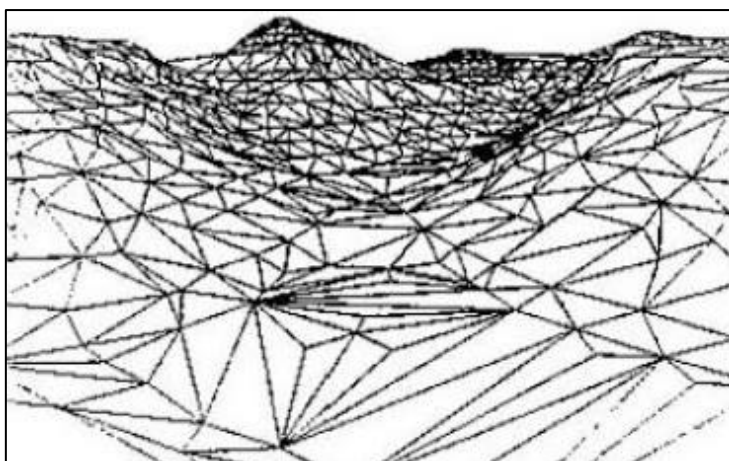


Fig. 5.3: Rappresentazione di un TIN

Gli elementi che concorrono a definire la geometria finale di una superficie generata attraverso un TIN sono analizzati qui di seguito (Tonini, 2006):

– **Nodi**

Sono le unità fondamentale per la creazione di un TIN. I Nodi non vengono generati dal modello, ma derivati direttamente dai dati di input (chiamati anche vertici). Ogni nodo, durante il processo di interpolazione delle informazioni di partenza, viene incorporato nella struttura di triangolazione del TIN, da qui la necessità che ognuno di essi abbia un ben preciso valore di elevazione.

– **Spigoli**

Ogni nodo è congiunto con i nodi più vicini tramite collegamenti chiamati spigoli, che formano così dei triangoli. Ogni spigolo ha due nodi.

– **Triangoli**

Dalla composizione di tre spigoli si crea un triangolo. Ogni faccia triangolare descrive il comportamento di una porzione della superficie del TIN. Le coordinate X, Y, e Z definiscono i valori dei tre nodi appartenenti ad un triangolo e possono essere usati per dedurre informazioni sulla faccia, come pendio, aspetto, area di superficie, e lunghezza di superficie. Dall'insieme di tutti i triangoli è possibile dedurre informazioni supplementari sulla superficie come pendenza, aspetto, volume racchiuso, profili e l'analisi di visibilità.

5.2 Grid

Il Grid è una matrice di celle ognuna delle quali può contenere un valore descrittivo di una proprietà o caratteristica. Nel caso di DTM ogni cella di un Grid contiene il valore di elevazione del solo terreno e tale valore è localizzato nel centroide della cella. Questa può essere considerata come una unità uniforme di superficie che rappresenta una parte della superficie della Terra, e la dimensione delle celle (ossia la risoluzione del Grid) determina la precisione della rappresentazione del Grid nei riguardi della reale superficie topografica. La scelta della dimensione delle celle dipende sia dalla risoluzione dei dati di partenza sia dall'utilizzo finale del DTM: dev'essere abbastanza piccola per il dettaglio richiesto ma grande abbastanza da permettere il suo efficiente immagazzinamento ed analisi da parte del computer (Tonini, 2006).

I requisiti di precisione del DTM variano in funzione delle applicazioni: ad esempio per l'esecuzione di costruzioni, in cui è richiesta una elevata precisione in quota, sono dell'ordine di ± 0.30 m. La difesa del suolo, la sua programmazione d'uso, invece, esigono precisioni del DTM che arrivano fino a circa ± 3 m, mentre per una cartografia tecnica è richiesta una localizzazione delle curve di livello di $\pm 2-3$ m (Tonini, 2006).

Nella rappresentazione del Grid l'area intorno al centroide della cella ha un valore di elevazione compreso tra il valore della cella in esame e quello delle celle vicine, simulando una superficie continua (Fig. 5.4).

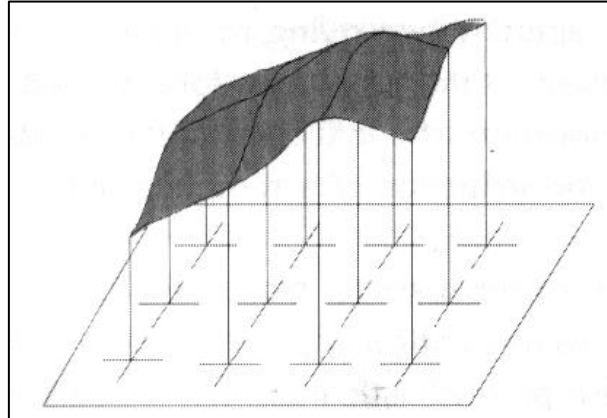


Fig. 5.4: Rappresentazione continua di un Grid

Una cella può anche essere vista come rappresentazione di un'area: in questo caso l'intera cella è considerata avere lo stesso valore e i cambiamenti di valore avvengono solamente ai bordi delle celle. In questa interpretazione le celle sono considerate come oggetti discreti con limiti discreti (Fig. 5.5). Questa rappresentazione è di solito utilizzata dai software per il calcolo di volumi tramite *raster*.

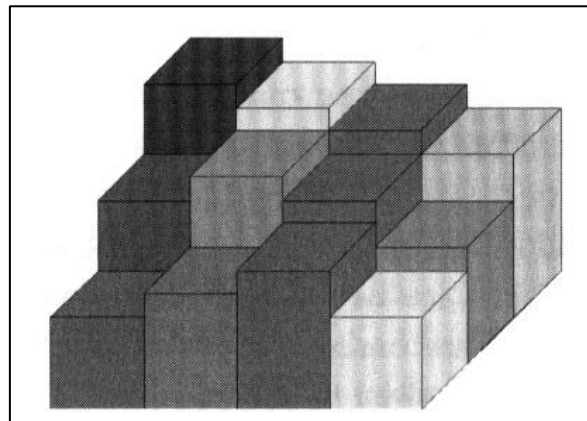


Fig. 5.5: Rappresentazione discreta di un Grid

Creare una superficie topografica tramite grid significa determinare il valore di elevazione anche nei punti non campionati, ossia dove non sono disponibili valori di elevazione. Le tecniche per la creazione di una "*gridded surface*" sono riconducibili ad operazioni di interpolazioni. Il principio base delle tecniche di interpolazione è che oggetti che si trovano spazialmente vicini tendono ad essere più simili rispetto ad oggetti spazialmente lontani (Tonini, 2006).

I metodi più appropriati e utilizzati nella interpolazione dedicata alla ricostruzione della superficie topografica sono:

5.2.1 Natural Neighbour Interpolation

Metodo di interpolazione basato su una sorta di media pesata. Per determinare il valore di ogni punto X_0 (appartenente al *dataset* n) si selezionano i valori più vicini al punto da interpolare ed i pesi sono proporzionati alle aree dei poligoni vicini. Per tale motivo, questo è stato definito interpolazione dei vicini naturali (*natural neighbour interpolation*). Le distanze A_i sono scalate da 0 a 1 in modo che la loro somma sia pari a uno. E' possibile ricavare il peso λ dei punti coinvolti nell'interpolazione in funzione della distanza attraverso l'equazione (3):

$$\lambda_i = \frac{A_i}{\sum_{k=1}^n A_k} \quad \text{per tutti gli } i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

Questo significa che se un punto X_i non è un punto "vicino" allora esso non ha un'area in comune con il *target point* X_0 , ed il suo peso è nullo ($\lambda_i=0$). Questo interpolatore è continuo e "liscio", cioè non ha dei cambiamenti bruschi come la triangolazione vista precedentemente (Tonini, 2006).

Il *Natural Neighbour Interpolation* è semplice da utilizzare, non richiede di specificare nessun parametro come il raggio di ricerca dei vicini, o il numero dei vicini, ed è piuttosto appropriato quando i campioni sono distribuiti in maniera irregolare. Il problema di questo metodo è che esso produce dei risultati inaccettabili dove i dati sono molto addensati, e forma delle "punte".

5.2.2 Funzioni inverse della distanza pesata

L'interpolazione tramite funzioni inverse della distanza pesata (*Inverse Distance Weighted, IDW*) sono più elaborate della triangolazione. Questi metodi sono basati su funzioni in cui i pesi sono definiti dalla seguente equazione (4):

$$\lambda_i = \frac{1}{|X_i - X_0|^\beta} \quad \text{con } (\beta > 0) \quad (4)$$

nella quale la somma di tutti i pesi è uguale a 1. In questo modo i campioni più vicini hanno un peso maggiore di quelli più lontani. La scelta più popolare è quella di $\beta = 2$. Se X_i ed X_0 coincidono, allora il peso diventa infinito e la stima in X_i è uguale a X_0 , come accade nella triangolazione. È chiaro che aumentando la distanza dal *target point*, il valore del peso diminuirà, e sarà tanto minore quanto maggiore sarà la potenza. Questo metodo è un interpolatore molto appetibile per la sua semplicità e rapidità d'uso benché la scelta dei pesi sia arbitraria e non esista una misura dell'errore compiuto durante l'interpolazione (Tonini, 2006).

Le figure qui sotto rappresentano graficamente le differenze tra le varie tipologie di interpolazione (Fig. 5.6, 5.7).

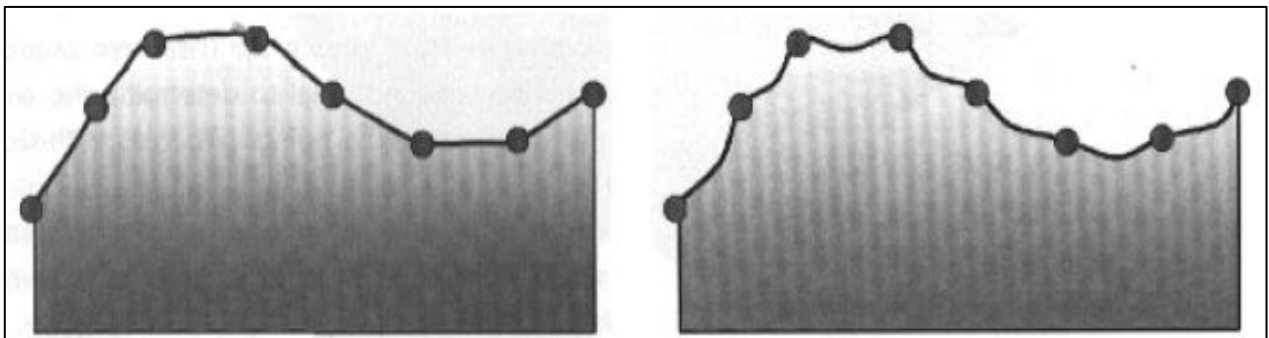


Fig. 5.6: Sezione di un DTM ottenuto tramite interpolazione Natural Neighbour (a sinistra) e tramite IDW (a destra)

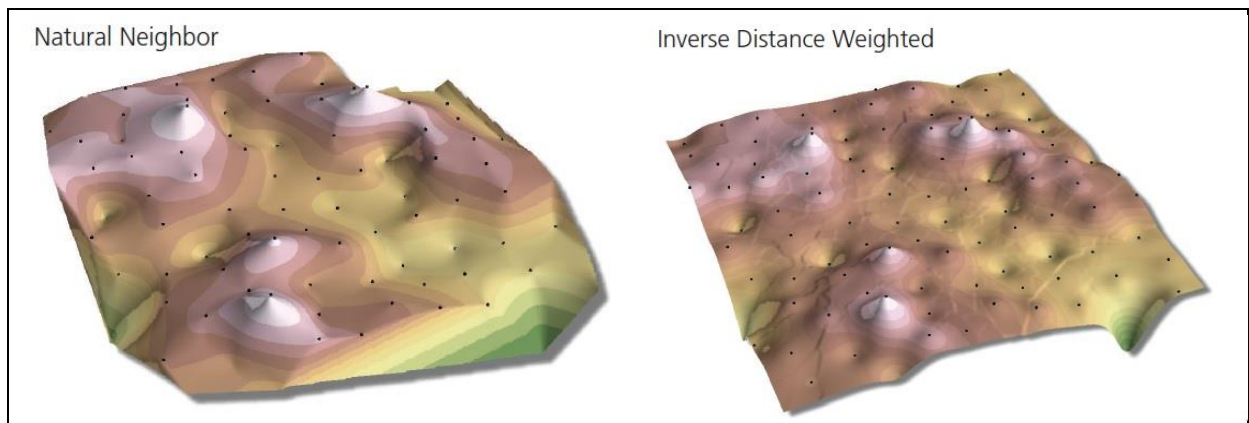


Fig. 5.7: DTM ottenuto tramite interpolazione Natural Neighbour (a sinistra) e tramite IDW (a destra)

6. ELABORAZIONE DEI DATI

Per pervenire alla determinazione delle variazioni morfologiche dell'alveo del canale "c08" sono stati analizzati i rilievi ALS effettuati nel 2006, 2010, 2011 e infine il rilievo TLS del 2013. In particolare sono stati messi a confronto i DTM ottenuti dall'interpolazione dei punti rilevati al fine di realizzare le mappa di deposito ed erosione utili alla stima dei volumi mobilizzati. Inoltre, per evidenziare tale variazione, sono state messe a diretto confronto alcune sezioni estratte dai DTM ALS e TLS in corrispondenza di altrettante sezioni rilevate con strumentazione GNSS.

L'analisi combinata di una serie di dati ottenuti da diverse tipologie di strumenti di rilevamento topografico (ALS, TLS, GNSS) ha richiesto l'impiego di diversi *software* di elaborazione.

In particolare per quanto riguarda il trattamento delle nuvole di punti LiDAR (sia ALS che TLS) sono stati utilizzati, in maniera diversa, i *software* Leica Cyclone vs 8.0 e CloudCompare v2, mentre la creazione dei DTM e la successiva analisi volumetrica sono state condotte in ambiente ESRI ArcGIS 9.3.1.

6.1 I software utilizzati

Per l'elaborazione dei punti rilevati con il GPS, per confrontare e gestire tra loro le diverse scansioni, per rappresentare geograficamente i dati sono stati utilizzati principalmente i seguenti software:

– **Leica Cyclone 8.0:**

Software di scansione e *processing* di punti TLS è stato sviluppato per operare efficacemente con tutti i sistemi *laser* a scansione di *Leica HDS (High Definition System)* (Fig. 6.1).

Il pacchetto è costituito da una serie di moduli atti alla esecuzione di differenti operazioni come: il modulo SCAN per l'acquisizione delle nuvole di punti, SURVEY per la programmazione del rilievo, IMPORT per l'importazione dei dati di diversi standard, REGISTER per la registrazione delle nuvole, MODEL per il magliaggio (*meshing*) e la modellazione, VIEWER-PRO per la visualizzazione 3D, PUBLISHER per la pubblicazione in vari formati, CLOUDWORK per il *processing* delle nuvole e così via (Casula *et al.*, 2010).



Fig. 6.1: Interfaccia di Leica Cyclone 8.0

– **CloudCompare v2:**

E' un software open source per il trattamento delle nuvole di punti (Fig. 6.2). Permette di eseguire il confronto tra due nuvole di punti 3D o tra una nuvola di punti ed una maglia triangolare, oppure, grazie ai molti algoritmi avanzati, di fare il ricampionamento, la registrazione tra copie di scansioni, colore, calcolo delle normali, ecc.

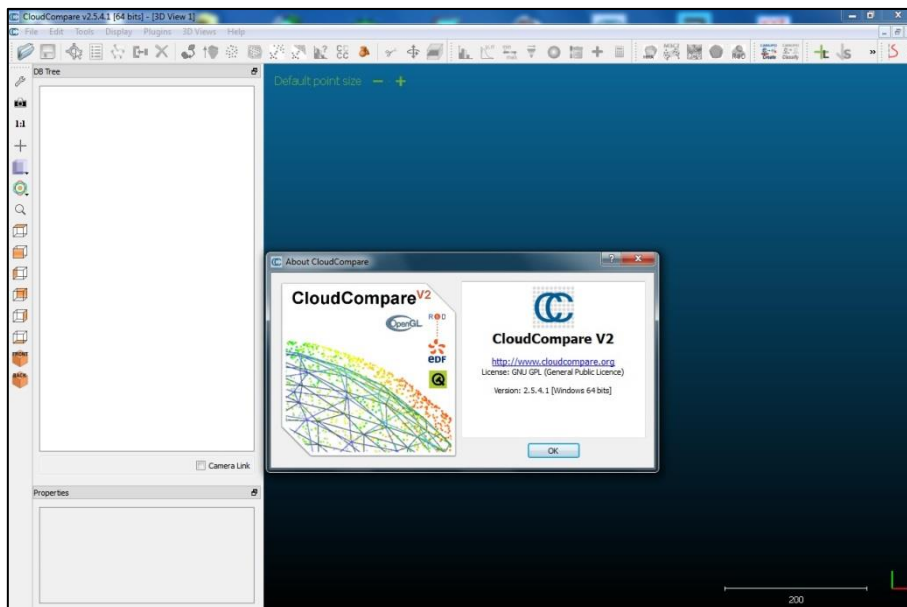


Fig. 6.2: Interfaccia di CloudCompare v2

– **ESRI ArcGIS 9.3.1:**

Si compone di una serie di strumenti desktop (ArcInfo, ArcEditor, ArcView) per la gestione dei dati da postazioni fisse e da applicativi per la gestione dei dati in remoto (ArcExplorer, ArcIMS, ArcPad) (Niccoli, 2007).

ArcView, utilizzato in particolare per questo studio, comprende un insieme di applicazioni integrate (Rosson, 2014):

- ArcMap: ambiente di visualizzazione geografica dei dati, *editing*, interrogazione, analisi e restituzione cartografica (Fig. 6.3);
- ArcCatalog: permette di organizzare la struttura dei dati, creare o cancellare nuovi file;
- ArcToolbox: contiene una serie di strumenti per la conversione dei dati da un formato ad un altro, esportazione, importazione e per la proiezione dei *files* geografici.

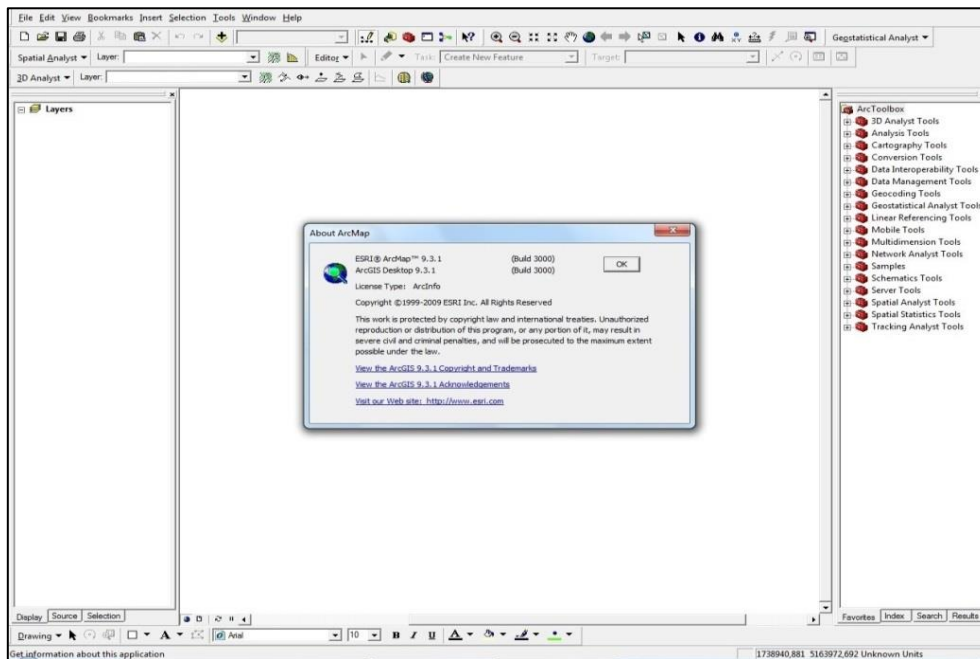


Fig. 6.3: Interfaccia di ArcMap e ArcToolbox

Utilizzando tutte e tre queste applicazioni è possibile svolgere qualsiasi operazione GIS, dalla più semplice alla più avanzata.

6.2 Fasi operative

Nel complesso sono state svolte le seguenti fasi operative:


1. Conversione delle curve di livello dell'ALS 2010 in una nuvola di punti:

Attraverso un *tool* di ArcGIS è stata estratta dalle curve di livello del rilievo 2010 la relativa nuvola di punti x,y,z riferita al sistema Gauss-Boaga.

2. Allineamento e georeferenziazione delle scansioni del rilievo TLS del 2013:

Nel 2013 l'area di studio è stata rilevata con il *laser scanner* Leica C10; inoltre è stata predisposta una rete di appoggio topografico mediante stazioni GPS allo scopo di consentire l'allineamento delle diverse scansioni e la georeferenziazione dei rilievi nello stesso sistema di riferimento dei DTM derivati dai dati LiDAR, in questo caso il sistema nazionale Gauss-Boaga fuso Ovest. La possibilità di ricorrere per tale scopo ad una serie di *target* retroriflettenti come punti di controllo a terra (GCP) è stata scartata già durante la pianificazione del rilievo TLS, in seguito ad un'attenta valutazione della morfologia e dell'acclività del luogo, dei tempi richiesti e della necessità di dover operare in condizioni di massima sicurezza.

Si è scelto pertanto di adottare il metodo di georeferenziazione delle singole stazioni *laser* con il GPS. Tra i metodi di georeferenziazione è stato scelto quello per intersezione spaziale inversa (*Resection*). Rilevando con il GPS le coordinate (nel sistema WGS84) di due *target* Leica è possibile ricavare i sei parametri utili per la rototraslazione; questa procedura è stata ripetuta per ogni stazione *laser*. Complessivamente il rilievo del canale "c08" ha richiesto l'acquisizione di una serie di scansioni da 6 differenti stazioni e l'impiego di 8 *target* disposti ai lati del medesimo (Tab. 6.1).

Stazione Laser	Target osservati	
1	T1, T2	
2	T2, T3, T4	
3	T4, T5	
4	T5, T6	
5	T6, T7	
6	T7, T8	

Tab. 6.1: Geometria dei target

Le coordinate delle stazioni di presa e dei *target* sono state misurate tramite Ricevitore Topcon "GRS-1" con antenna GNSS "PGA-1" in modalità RTK, impiegando come stazione di riferimento un secondo ricevitore Topcon Hiper Pro montato su un treppiede e posizionato su un punto geodetico ritrovato nelle vicinanze.

Poiché di tale punto non erano note le coordinate, è stata eseguita un'osservazione statica di circa otto ore, definendo una *baseline* con la stazione permanente di Borca di Cadore (BL) facente parte della rete di stazioni permanenti GNSS della Regione Veneto (Tab. 6.2) istituita per il controllo delle deformazioni.

<p>BORCA DI CADORE (BORC)</p> <p>Coordinate: Latitudine: 46° 26' 14"N Longitudine: 12° 13' 5"E</p> <p>Altitudine: 989 m</p> <p>Tipo antenna: LEIAT504 LEIS</p> <p>Tipo ricevitore: Leica GRX1200GGPRO</p> <p>Ente di riferimento: Regione Veneto</p>	
--	--

Tab. 6.2: Stazione permanente di Borca di Cadore della Rete GPS Veneto

Successivamente le coordinate dei centri dei *target* sono state calcolate in laboratorio attraverso lo studio dei dati GPS in Topcon Tools, *software* per la post-elaborazione, l'analisi e la compensazione delle reti topografiche. Al termine di questa fase preliminare, le coordinate sono state salvate in un file di testo e importate nel *Software* Leica Cyclone 8.0 per la georeferenziazione ed infine la registrazione globale.

L'operazione di registrazione in un sistema globale mediante punti di controllo naturali o artificiali è un passo estremamente delicato che richiede molta attenzione durante la campagna di misura; un errore di posizionamento del *target*, che solitamente corrisponde ad un *offset* in quota, può infatti distorcere la geometria dell'intero sistema. Di seguito si riportano gli *offset* dei principali strumenti usati per la georeferenziazione delle scansioni *laser* (Fig. 6.4).

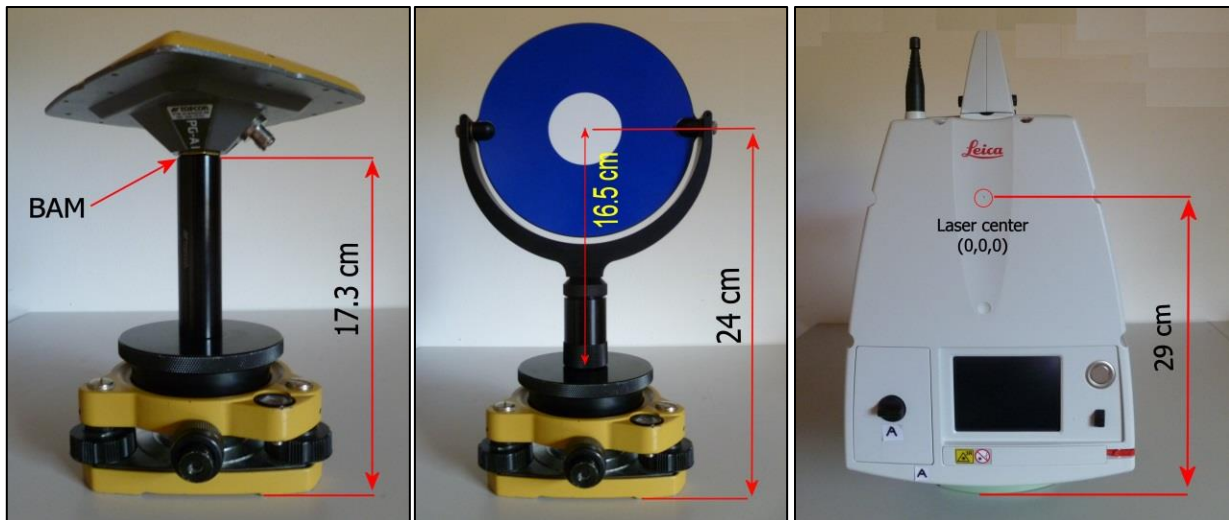


Fig. 6.4: Offset Antenna GPS PGA-1 con distanziatore Topcon (10 cm) (a sinistra), offset Target circolare Leica 6" Tilt & Turn (al centro), offset centro laser-base tricuspide integrata (a destra)

Per la registrazione globale delle scansioni si è applicato l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) che si basa sulla ricerca di punti omologhi tra porzioni comuni di punti da registrare, e successivamente applica una trasformazione rigida tra scansioni mantenendone una come riferimento; questa procedura viene ripetuta finché non si arriva a convergenza. L'algoritmo ICP assume che una parte della nuvola di punti da registrare sia un sottoinsieme dell'altra (Fusiello *et al.*, 2002). Operando poi in CloudCompare v2, software per l'elaborazione e la modellazione delle nuvole di punti 3D, il *dataset* risultante del 2013 è stato confrontato con i dati LiDAR del 2006, 2010 e 2011 per verificare la sovrapposizione delle varie nuvole di punti.

3. Filtraggio della nuvola di punti del TLS 2013:

Sempre in CloudCompare v2 si è proceduto a un filtraggio manuale della nuvola di punti ottenuta dal TLS, dapprima eliminando i punti isolati, o eccessivamente esterni al canale, o effetti da errori di quota e di posizione, e poi rimuovendo la vegetazione presente.

4. Conversione delle nuvole di punti xyz in multipoint feature:

Dopo aver georiferito tutte le nuvole di punti xyz nello stesso sistema di riferimento (rappresentazione cartografica di Gauss-Boaga con quote geodetiche), esse sono state convertite in un *multipoint feature* mediante il tool di ArcGIS 9.3.1: ArcToolBox → 3D Analyst Tools → ASCII 3D to Feature Class. Questo passaggio è stato necessario perché la versione 9.3 di ArcGIS usata per l'analisi non permette di realizzare direttamente *raster* DEM partendo dalla nuvola di punti.

5. Conversione da formato vettoriale multipoint feature a DEM raster:

Attraverso il metodo di interpolazione *Natural Neighbour* e IDW è stata ricostruita la superficie topografica del canale “c08”; ciò è stato possibile utilizzando il tool di ArcGIS: ArcToolBox → 3D Analyst Tools → Raster Interpolation → “Natural Neighbor” o “IDW”.

Per la generazione dei *raster* è stata scelta una cella di dimensioni 0,50 m x 0,50 m perché da diverse prove effettuate con grandezze diverse del grid, e considerando la densità dei dati di *input*, queste rappresentavano in maniera migliore l’andamento del terreno.

Inoltre, per rappresentare i DTM ottenuti con una migliore resa visiva, si è scelto di derivare da essi il *raster* dell’illuminazione solare relativa o delle ombreggiature (*Hillshade*). Il tool di ArcGIS utilizzato è: ArcToolBox → 3D Analyst Tools → Raster Surface → Hillshade.

6. Creazione dei TIN:

Oltre al metodo di grigliatura per la costruzione del modello digitale del terreno (DTM), si è voluto utilizzare anche la rappresentazione mediante TIN. In questa versione di ArcGIS la realizzazione di questo modello si articola in due fasi: la prima crea un TIN vuoto con riferimento spaziale predefinito (grazie al tool di ArcGIS : ArcToolBox → 3D Analyst Tools → Tin Creation), la seconda crea su questo la superficie sulla base dei dati in ingresso (ArcGIS: ArcToolBox → 3D Analyst Tools → Edit Tin).

7. Conversione dei TIN in DTM:

Attualmente con i GIS non è possibile effettuare operazioni di *overlay* con strutture dati a maglia triangolare. Per tanto si è reso necessario convertire la superficie a TIN con delle celle quadrate con quota e dimensione costante per ogni cella (dimensione: 0,5 m x 0,5 m), come i precedenti grid. Il metodo di interpolazione utilizzato per effettuare questa conversione è stato quello lineare. Anche in questo caso si è utilizzato un tool specifico di ArcGIS è: ArcToolBox → 3D Analyst Tools → Conversion → From TIN → TIN to Raster. Il DTM 2013 a maglie quadrate realizzato in precedenza è stato utilizzato come base di riferimento per convertire tutte le altre mappe vettoriali, in modo da avere tutte le celle “snappate” sugli stessi vertici ed essere esattamente sovrapponibili. Anche qui poi si è utilizzato il tool “Hillshade” di ArcGIS per ottenere una migliore resa visiva del modello digitale del terreno.

8. Realizzazione della maschera:

Per confrontare correttamente tra loro i diversi DTM e i TIN convertiti in *raster* è necessario:

- lo stesso numero di celle;
- celle di pari dimensione;

- la medesima area ed estensione.

Per questo motivo è stata creata una “maschera”, cioè un *layer* di tipo poligono che contiene tutti i punti di interesse del rilievo; i contorni della “maschera” corrispondono alle sponde del canale rilevato con il TLS nel 2013 (Fig. 6.5).

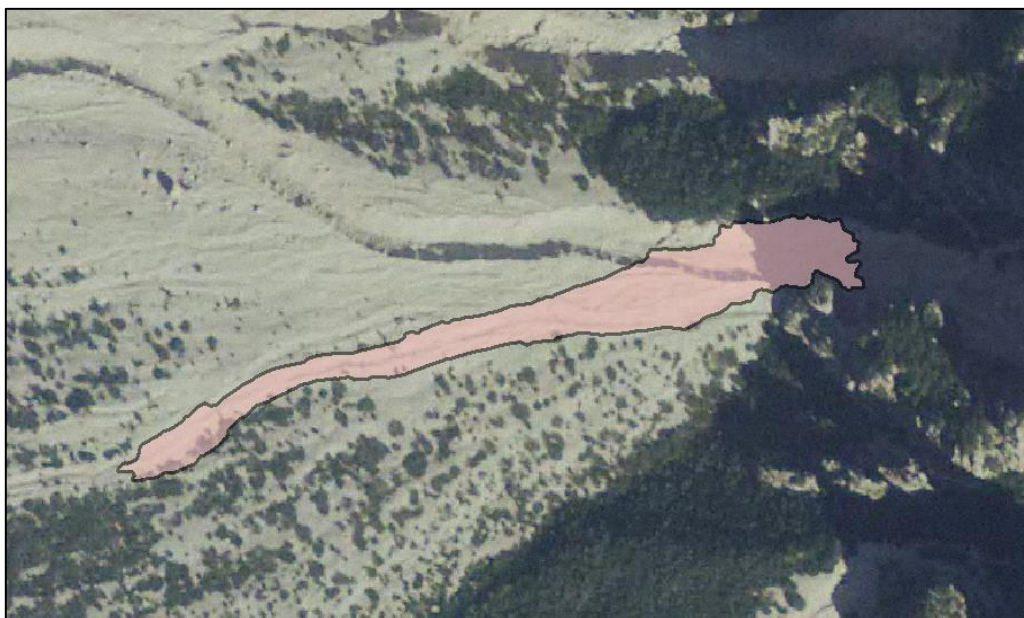


Fig. 6.5: Maschera del canale

Questo poligono è stato poi usato per “tagliare” i diversi *raster* dei DTM attraverso il *tool* di ArcGIS: ArcToolBox → Spatial Analyst Tools → Extraction → Extract by Mask, in modo da estrarre da essi la parte comune all’area rilevata con il TLS Leica C10 nel 2013.

9. Differenza tra i DTM:

Dopo aver scelto il metodo di interpolazione più appropriato (*Natural Neighbour*, IDW, TIN), grazie anche all’analisi degli “Hillshade” dei DTM creati, si è eseguito il confronto tra i diversi modelli digitali del terreno sottraendo algebricamente il DTM all’epoca xx da quello rilevato all’epoca successiva yy. In base a questo criterio sono stati ottenuti i seguenti DTM di differenza (DoD, *Difference of DEM*):

- 2006 (ALS) – 2010 (ALS)
- 2010 (ALS) – 2011 (ALS)
- 2011 (ALS) – 2013 (TLS)

Sono state ottenute così delle mappe nelle quali differenze di quota negative indicano fenomeni di deposito mentre valori positivi denotano fenomeni di erosione. Questa mappa è spesso chiamata anche “mappa dei volumi”.

A tale scopo si è utilizzato il *tool* di ArcGIS: ArcToolBox → Spatial Analyst Tool → Map Algebra → Raster Calculator. L'applicazione alla mappa dei volumi di uno specifico modello di colorazione ha permesso la visualizzazione in classi di spessore dei volumi di erosione e deposito. In essa, le zone soggette a deposito sono rappresentate con tonalità di rosso, mentre le zone in erosione con tonalità del blu.

10. Analisi della parete rocciosa

A monte del canale "c08", ove questo inizia a incidere il massiccio del Pomagagnon, è presente una parete rocciosa verticale che a luglio 2013 è stata soggetta a un fenomeno di crollo che ha liberato nel canale numerosi metri cubi di sedimenti disponibili per le colate (Fig. 6.6).



Fig. 6.6: Maschera della parete verticale crollata

Durante l'interpolazione sul piano orizzontale della griglia in ArcGIS, la struttura verticale della parete avrebbe potuto introdurre dei fenomeni di "distorsione" della superficie reale, falsando il DTM. Questo è dovuto all'elevata densità di punti di *input* a metro quadro e alle loro quote (ortometriche) che presentano un *range* di valori molto grande. Per questo motivo le porzioni di nuvole di punte LiDAR aereo e terrestre corrispondenti alla parete verticale sono state ruotate di quasi 55° attorno all'asse y in CloudCompare v2 al fine di rendere tale parete "orizzontale".

11. Realizzazione delle mappe di deposito - erosione:

Al fine di stimare i volumi di deposito e di erosione è stato necessario ricorrere alla realizzazione di mappe che mettessero in evidenza i volumi di deposito e quelli di erosione.

Il tool di ArcGIS utilizzato per questa operazione è il seguente: ArcToolBox → 3D Analyst Tools → Raster Surface → Cut/Fill. Questo strumento sintetizza le aree e volumi differenti tra due superfici.

Esso individua le aree e volumi della superficie che sono stati modificati dal deposito e dall'erosione di materiale.

12. Stima dei volumi mobilizzati:

Esportando la tabelle degli attributi delle mappe di erosione - deposito in Microsoft Excel è stato possibile calcolare per ognuna di esse i diversi volumi mobilizzati in m³.

13. Confronto tra sezioni

Per comprendere meglio le variazioni topografiche e morfologiche dell'alveo del canale "c08" sono state confrontate alcune sezioni GPS con i diversi *raster* DTM. Questo tipo di elaborazione ha consentito di evidenziare le discrepanze in termini di volume nel confrontare dei rilievi GPS con delle nuvole di punti x,y,z da TLS e LiDAR.

7. RISULTATI E DISCUSSIONI

Prima di illustrare i risultati ottenuti dall'analisi dei DTM e delle variazioni morfologiche e volumetriche relative al canale "c08", oggetto di questo studio, si riporta nella successiva tabella 7.1 la sequenza cronologica degli eventi (colate detritiche e rilievi topografici effettuati) che hanno interessato l'area di indagine.

Data	Evento
21 settembre – 21 ottobre 2006	Rilievo LiDAR 2006
Pre-agosto 2010	Rilievo LiDAR 2010
9-11 agosto 2010	Rilievo GPS 2010
4 luglio 2011	Evento di colata detritica
8-9;15 luglio 2011	Rilievo GPS 2011
Inizio agosto 2011	Evento di colata detritica
Fine agosto 2011	Evento di colata detritica
Novembre 2011	Rilievo LiDAR 2011
Luglio 2013	Evento di crollo parziale della parete verticale rocciosa
6 agosto 2013	Rilievo TLS 2013

Tab.7.1: Cronologia degli eventi

7.1. DTM e metodi di interpolazione

Attraverso i metodi di interpolazione *Natural Neighbour*, IDW, e lineare del TIN, per l'area del canale "c08" è stata prodotta una serie di DTM-grid ciascuno con celle di dimensione 0,50 m x 0,50 m (Fig. 7.1, 7.2, 7.3, 7.4).

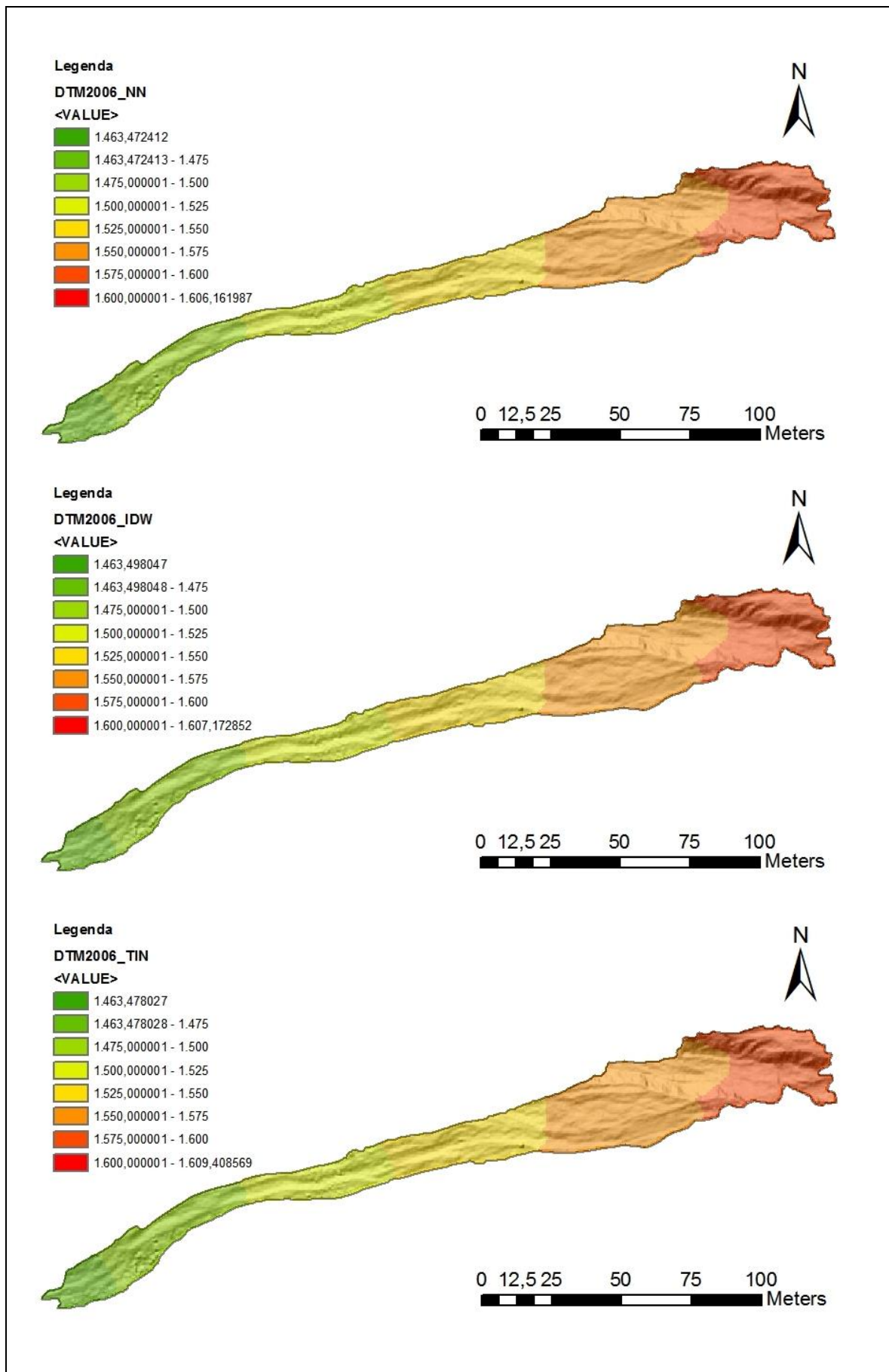


Fig. 7.1: DTM del 2006 ottenuti con interpolazione Natural Neighbour, IDW, e lineare del TIN

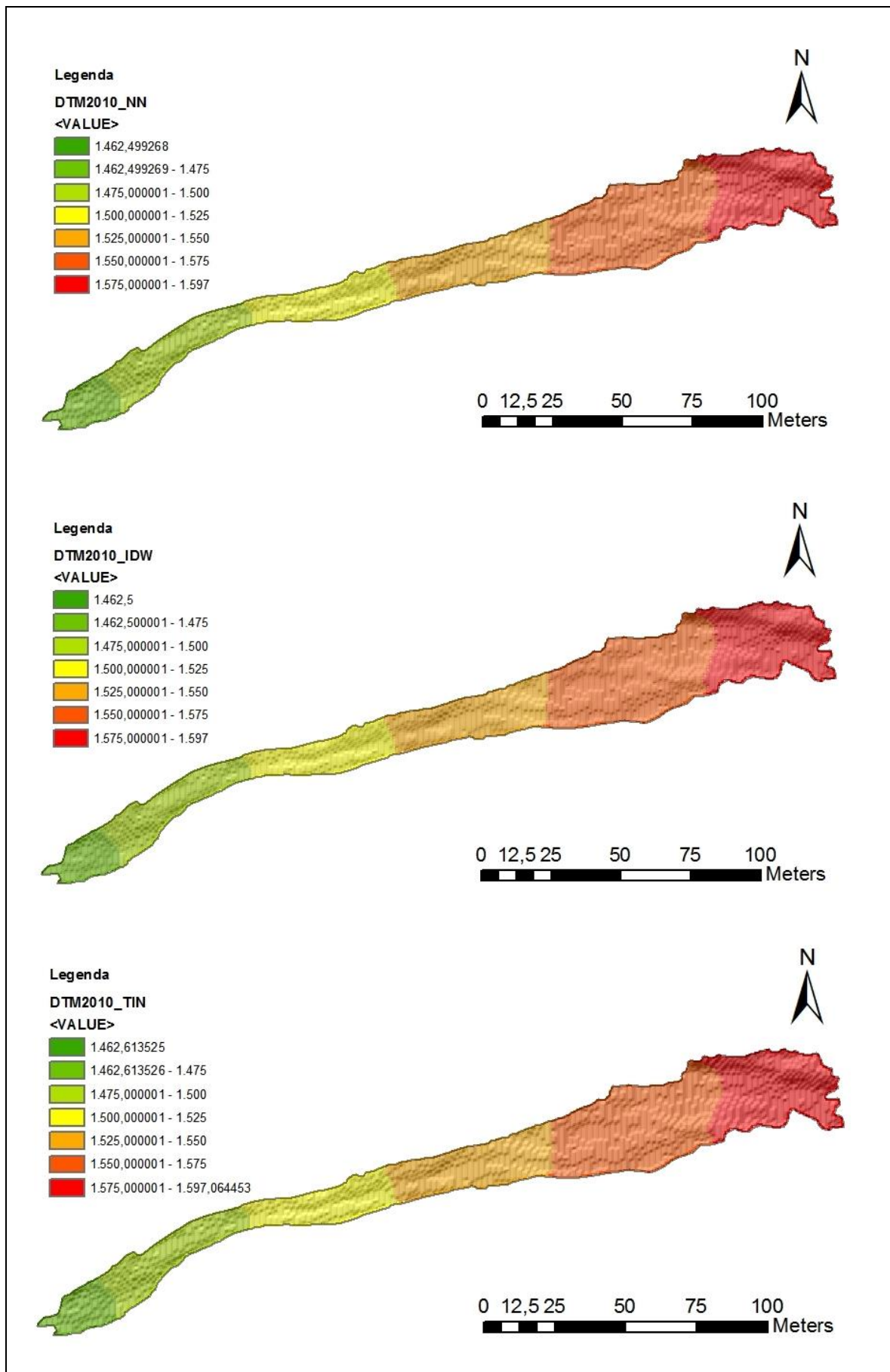


Fig. 7.2: DTM del 2010 ottenuti con interpolazione Natural Neighbour, IDW, e lineare del TIN

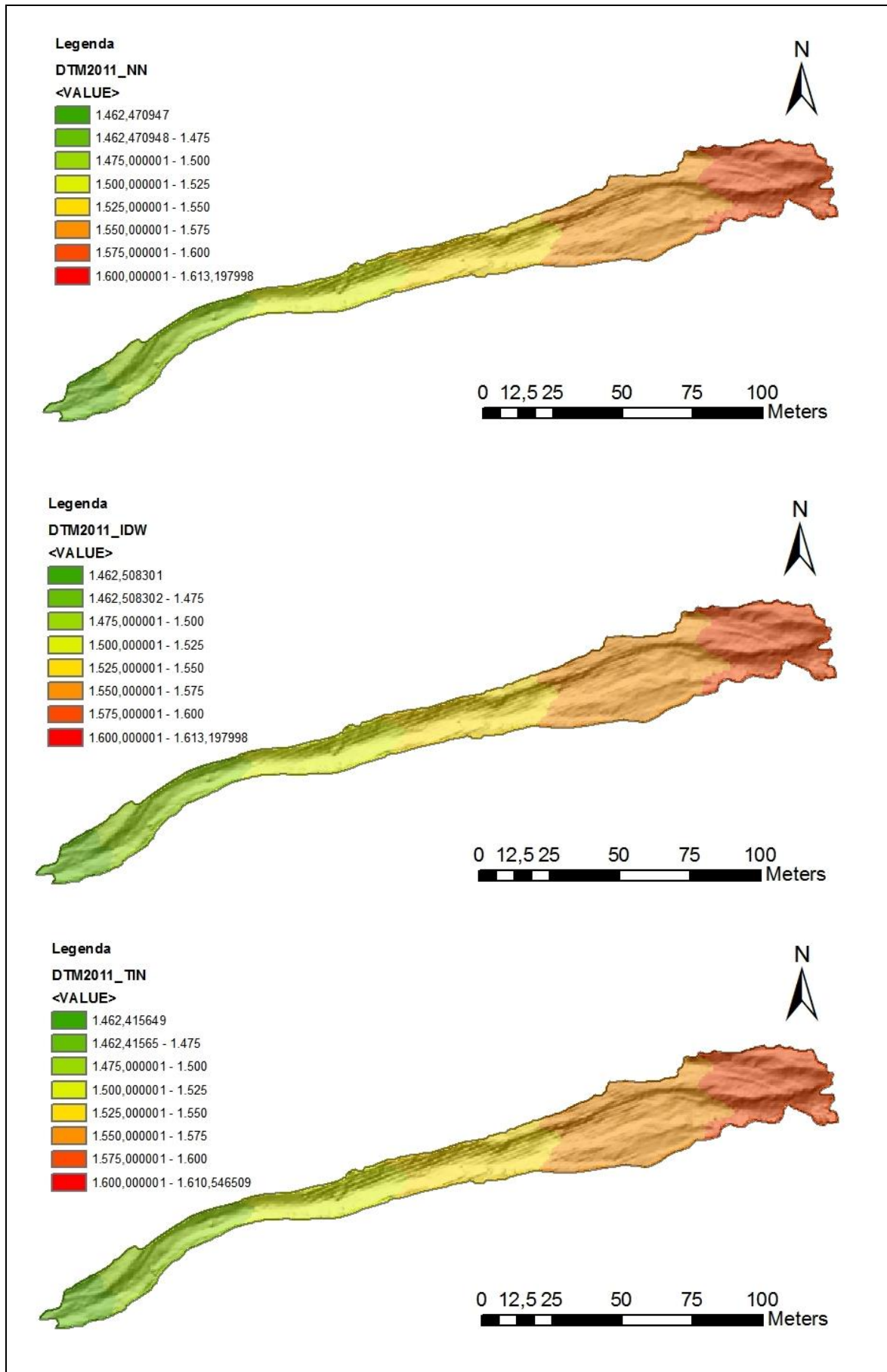


Fig. 7.3: DTM del 2011 ottenuti con interpolazione Natural Neighbour, IDW, e lineare del TIN

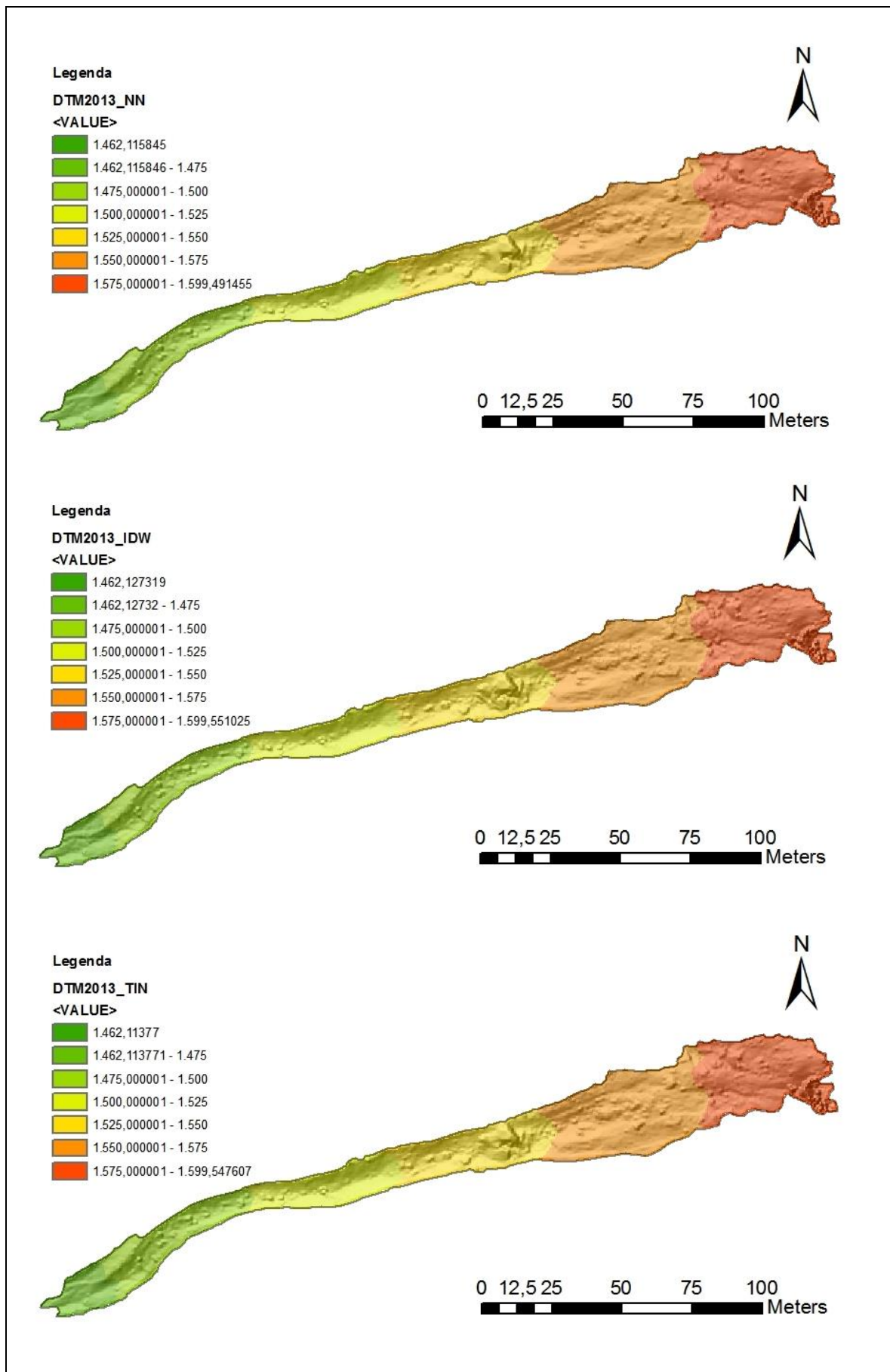


Fig. 7.4: DTM del 2013 ottenuti con interpolazione Natural Neighbour, IDW, e lineare del TIN

Già da un confronto visivo risulta evidente come i DTM del 2006 del tratto di canale considerato per l'analisi siano sostanzialmente identici per tutti e tre i metodi interpolazione. Ciò è dovuto alla bassa densità (numero di punti/m²) della nuvola di punti usata per la modellazione.

Come per il 2006, anche per i DTM del 2010 e 2011 non si riscontrano grosse differenze tra i tre metodi di interpolazione usati, a causa sempre del ridotto numero di dati di *input*.

Ben altro discorso meritano invece i DTM del 2013, nei quali si intravedono delle differenze nella modellazione del terreno dovute ad una più alta densità delle misure puntuali (media di circa 50 punti/m²) rispetto ai rilievi ALS del 2006 (media di 3,6 punti/m²), 2010 (1 punto/m²) e 2011 (media di circa 7 punti/m²). In particolare si può osservare quanto segue:

- Il DTM del 2013 interpolato con il metodo *Natural Neighbour (NN)*, per quanto simile all'IDW, presenta una superficie uniforme con curve molto smussate e regolari, ed alcuni artefatti ("punte") dove la densità dei dati di *input* è elevata. Il metodo NN lavora bene quando i punti della nuvola sono distribuiti in maniera irregolare;
- Il modello interpolato con l'IDW presenta invece una superficie di output "apparentemente" realistica e morbida;
- Il DTM ottenuto convertendo il TIN in formato *raster* con interpolazione lineare presenta brusche variazioni della superficie riconducibili alla natura dei TIN in corrispondenza al passaggio da un triangolo all'altro, con presenza di alcuni artefatti.

Questi risultati sembrano dar ragione alla scelta di utilizzare per la modellazione il metodo di interpolazione IDW anziché il *Natural Neighbour* e il TIN, ma dopo un'attenta valutazione si è scelto di utilizzare il *Natural Neighbour* per i seguenti motivi:

- È più semplice da utilizzare in quanto non richiede di specificare nessun parametro come il raggio di ricerca dei vicini, o il numero di vicini;
- È più regolare e dolce nella modellazione nonostante vi siano zone con densità variabili dei dati di *input*;
- È più consono per il tipo di dettaglio richiesto dal lavoro e fornisce prodotti più omogenei tra loro a partire da dati aventi gradi di dettaglio diversi (i 3 rilievi ALS hanno una densità puntuale inferiore rispetto al TLS del 2013).

Anche per quanto riguarda la porzione di parete rocciosa a monte del canale "c08", si è deciso di utilizzare il metodo di interpolazione *Natural Neighbour* con celle di 0,50 m x 0,50 m per la modellazione della superficie al fine degli studi sull'evento di crollo avvenuto nel luglio 2013. In questo caso però interpolazione non è stata applicata direttamente alle nuvole di punti LiDAR,

bensì ad una loro versione "ruotata" attorno all'asse Y del sistema di coordinate cartesiano in cui esse sono state georiferite. Questo accorgimento è stato adottato al fine di evitare fenomeni di "distorsione" nella rasterizzazione dell'area di interesse su una griglia regolare di celle quadrate, disposta sul piano orizzontale XY, definito dagli assi coordinati del sistema di riferimento bidimensionale utilizzato in ambiente GIS. Infatti, a parità di dimensione delle celle della griglia, la riproiezione di ciascuna di queste sulla parete mantenuta nella sua posizione originale ("verticale", con asse Z praticamente ad essa parallela), avrebbe interessato un'area effettiva maggiore di quella della cella stessa, falsando i risultati dell'interpolazione. In pratica, nelle condizioni geometriche originali, ciascuna cella avrebbe ricoperto in realtà una porzione della parete rocciosa maggiore di 0,50 m x 0,50 m, dando luogo ad un DTM errato o comunque poco rappresentativo del reale andamento del terreno. I DTM così ottenuti (Fig. 7.5) riportano, a causa della "rotazione", delle quote ortometriche non reali.

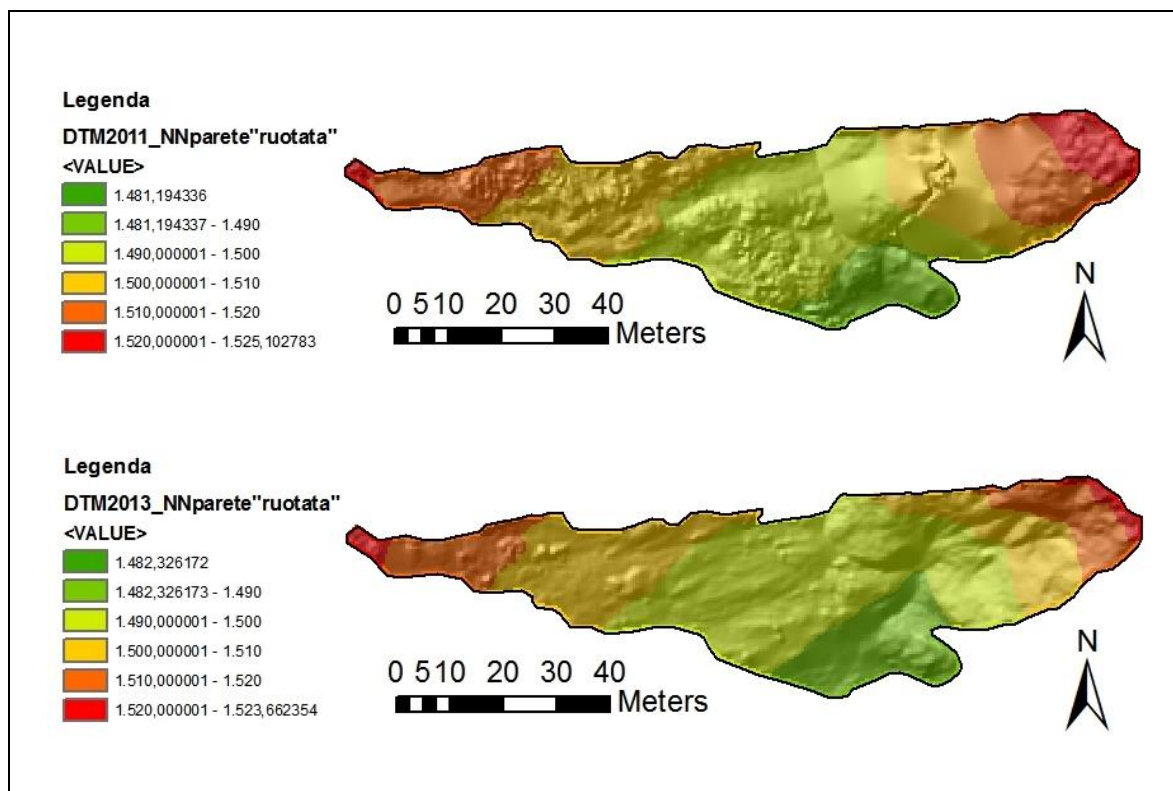


Fig. 7.5: DTM del 2011 e del 2013 della parete rocciosa ruotata secondo l'asse y

7.2 Mappe dei volumi

Il tratto di canale sottoposto alla stima dei valori dei volumi mobilizzati presenta una serie di caratteristiche morfologiche riportate di seguito in tabella 7.2:

CARATTERISTICHE MORFOMETRICHE DEL TRATTO DI CANALE SOTTOPOSTO ALLA STIMA DEI VOLUMI MOBILIZZATI	
Lunghezza	300 metri
Superficie planimetrica	5060 m ²
Quota massima	1613 metri s.l.m.
Quota minima	1462 metri s.l.m.
Quota media	1542 metri s.l.m.
Pendenza media	50 %
Larghezza massima	30 metri
Larghezza minima	8 metri

Tab. 7.2: Caratteristiche morfometriche del tratto di canale sottoposto alla stima dei volumi mobilizzati

Per lo studio delle variazioni morfologiche e topografiche del canale si è deciso di utilizzare la differenza tra due DEM (DoD, *Difference of DEM*) relativi ad epoche successive di misura. In particolare, dai DTM LiDAR disponibili sono state ottenute le seguenti combinazioni di differenze:

1. DTM 2006 (ALS) – DTM 2010 (ALS);
2. DTM 2010 (ALS) – DTM 2011 (ALS);
3. DTM 2011 (ALS) – DTM 2013 (TLS).

Da queste differenze si sono così ottenute delle “mappe dei volumi” in cui celle di quota negative indicano fenomeni di deposito (rappresentate con tonalità di rosso) mentre celle di quota positiva denotano fenomeni di erosione (rappresentate con tonalità di blu) (Fig. 7.6). Anche in questo caso le celle hanno dimensioni 0,50 m x 0,50 m.

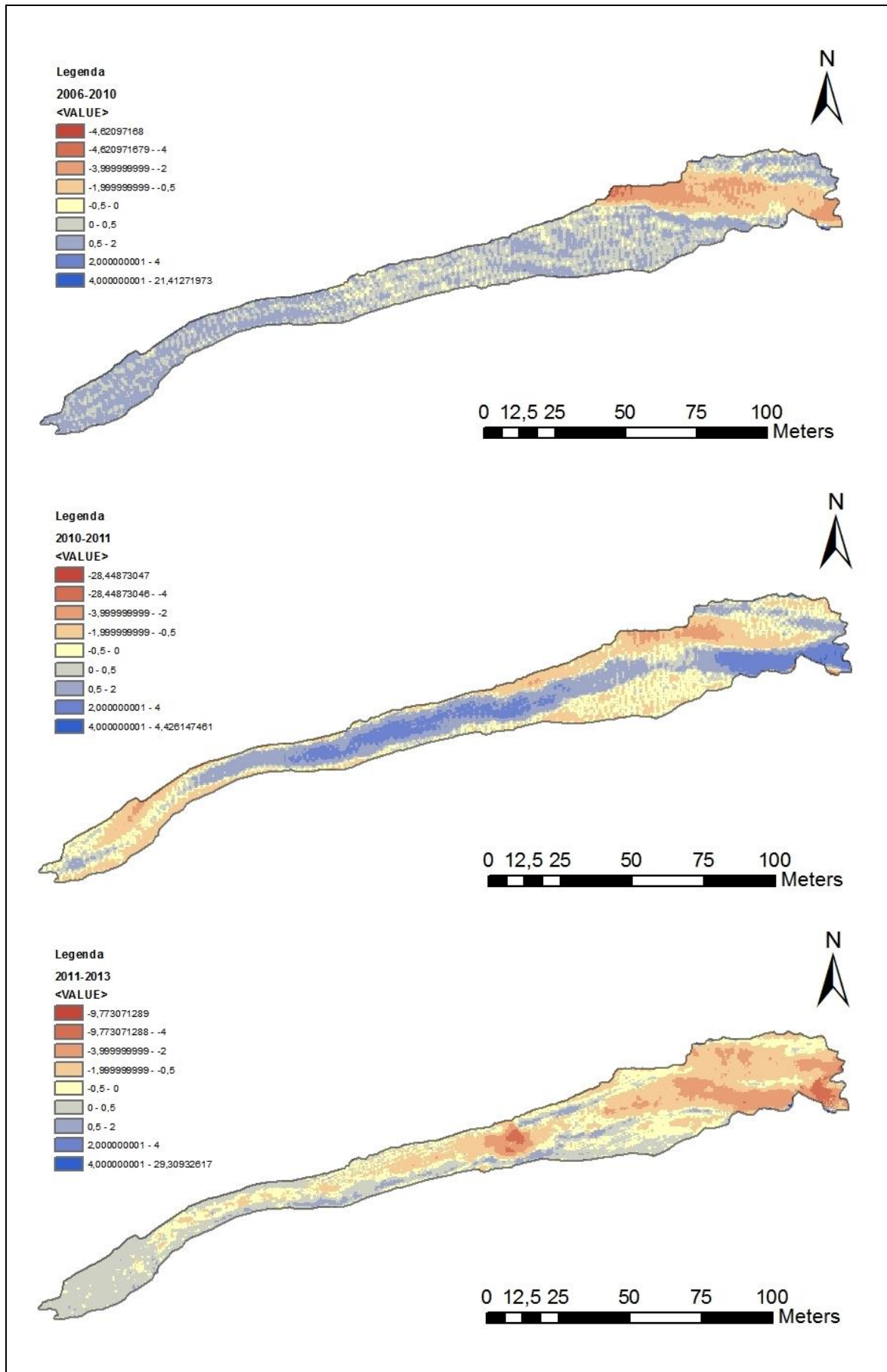


Fig. 7.6: Mappe dei volumi del canale secondo le tre combinazioni

Per quanto riguarda lo studio della parete rocciosa è stato messo a confronto il rilievo LiDAR (ALS) 2011 con quello TLS del 2013, ottenendo anche in questo caso una “mappa dei volumi” di tipo grid con celle di 0,50 m x 0,50 m. A tale mappa è stata poi applicato lo stesso criterio di classificazione a colori delle precedenti per evidenziare le zone di erosione e quelle di deposito.

In figura 7.7 sono illustrate le mappe delle variazioni volumetriche relative alla parete rocciosa, calcolate sulla base dei rilievi ALS 2011 e TLS 2013. Come si può vedere il *raster* conseguito dalla “rotazione” dei DTM attorno all’asse Y del sistema di riferimento della georeferenziazione, oltre ad avere un numero quasi doppio di celle (12652 rispetto le 7706 del primo), riporta dei valori relativi agli spessori massimi di erosione-deposito più contenuti, anche se l’estensione dell’area analizzata con le due procedure, proiettata sul piano della rasterizzazione, rimane pressoché invariata.

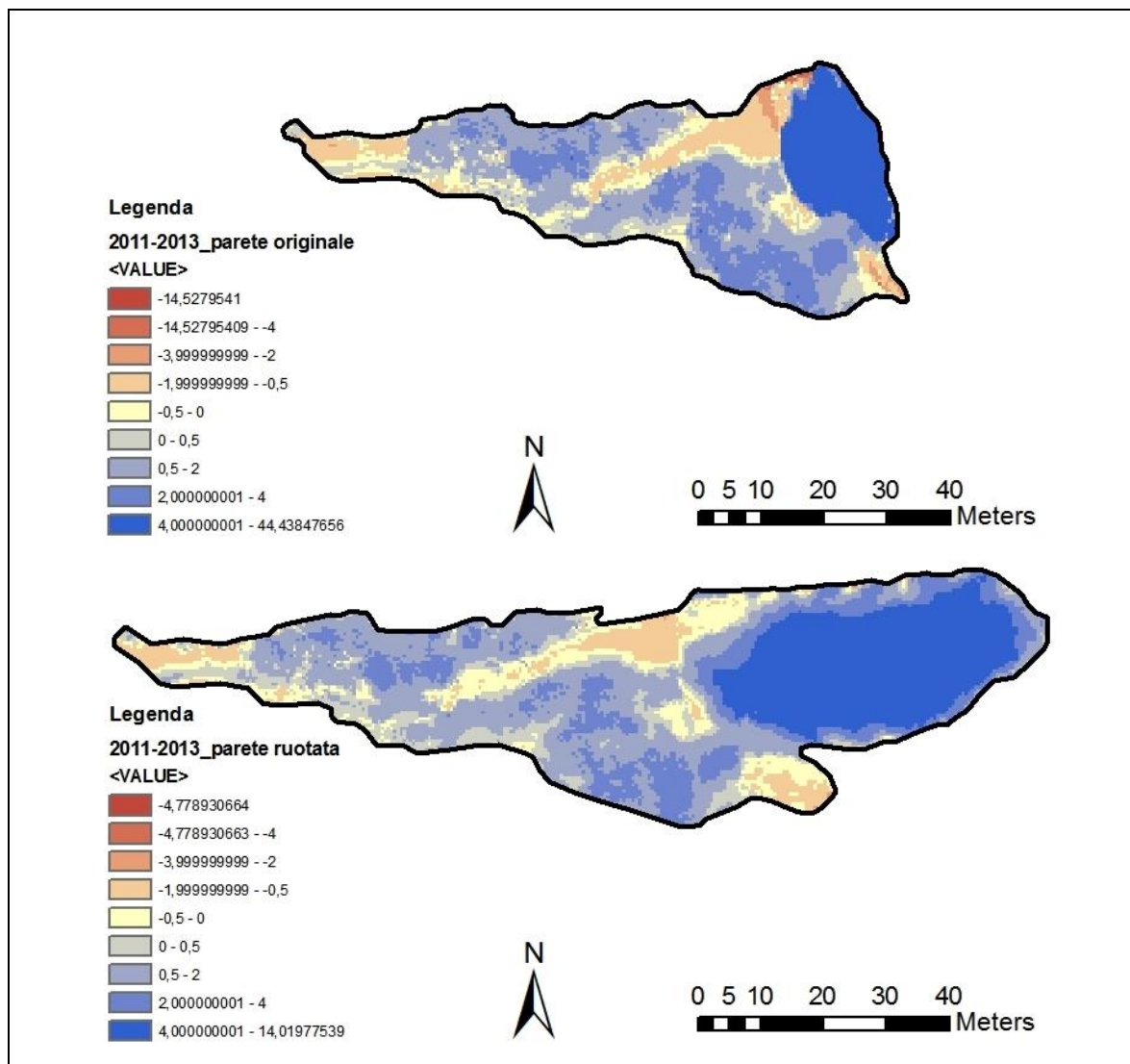


Fig. 7.7: Mappe dei volumi della parete (originale e ruotata secondo l’asse y) relative all’ultima combinazione ALS 2011 – TLS 2013

Già da queste analisi comparative si possono trarre le seguenti considerazioni:

- Nel tratto superiore del canale, in corrispondenza della parete verticale in uscita dal massiccio del Pomagagnon, si conferma il distacco di una grossa porzione di roccia dalla parete avvenuto nel luglio 2013 (tra il rilievo LiDAR 2011 e il TLS 2013) a conseguenza di un crollo parziale. Questo fenomeno ha liberato nel canale numerosi metri cubi di sedimenti che però non compaiono ai piedi della parete, poiché molto probabilmente sono stati trasportati a valle da fenomeni di trasporto solido di fondo (in quel periodo non si sono registrati colate detritiche) e dalla gravità stessa.
- Nel tratto iniziale del canale, tra il rilievo ALS 2006 – ALS 2010, si assiste all’occlusione progressiva dell’alveo grazie alla deposizione nel letto di quasi 5 m di sedimenti. Data la grande quantità di materiale depositato si presume che la causa di questa ostruzione sia stata molto probabilmente una colata detritica. Dall’analisi storica non sono segnalati *debris flow* in quel periodo, perciò dobbiamo dedurre che questo evento non sia stato registrato e che non si dispongano di dati sulla sua propagazione. Nel periodo successivo (ALS 2010 – ALS 2011) si registrano diversi eventi di colate che, scendendo verso valle, hanno incontrato il canale occluso portandolo perciò a cambiare direzione tanto da evitare il bacino di deposito costruito 150 m più a valle a protezione della strada statale Alemagna. Questo evento è stato già studiato e discusso in (Crucil, 2013). Dal novembre 2011 (ALS 2011) ad agosto 2013 (TLS 2013) non si riscontrano fenomeni di colata, però i sedimenti liberati dal crollo parziale della parete del massiccio del Pomagagnon nel luglio 2013 (alcuni con un diametro superiore al metro) hanno riempito il “nuovo” percorso di qualche metro (inizialmente profondo anche 3 metri).
- Nel tratto finale dell’area di studio, per il primo periodo (2006 – 2010) non si riscontrano significative variazioni in quanto il canale corre ancora sul suo “vecchio” percorso, al lato destro dell’area analizzata. Con l’occlusione e il cambio di direzione di quest’ultimo a causa degli eventi di *debris flow* (ALS 2010 – ALS 2011), il “nuovo” canale incide inizialmente anche di 4 metri lo strato superficiale dei depositi detritici, per poi restringersi di larghezza e diminuire di profondità (intorno al metro) man mano che scende verso valle. Nel tratto terminale sono presenti anche aree di deposito. Infine tra il rilievo ALS 2011 e il TLS 2013 il canale viene leggermente riempito dal materiale più fine proveniente dal crollo della parete verticale avvenuto a luglio 2013.

7.3 Mappe di deposito - erosione

Per la realizzazione delle mappe di deposito-erosione dell'area del canale (Fig. 7.8), adatte a mettere in risalto le differenze di volume, sono state mantenute le tre diverse combinazioni utilizzate per le mappe dei volumi. Il modello di colorazione usato individua le aree che sono state modificate dal deposito (rappresentate in rosso), dall'erosione (in blu), e quelle che non hanno subito variazioni volumetriche (in grigio).

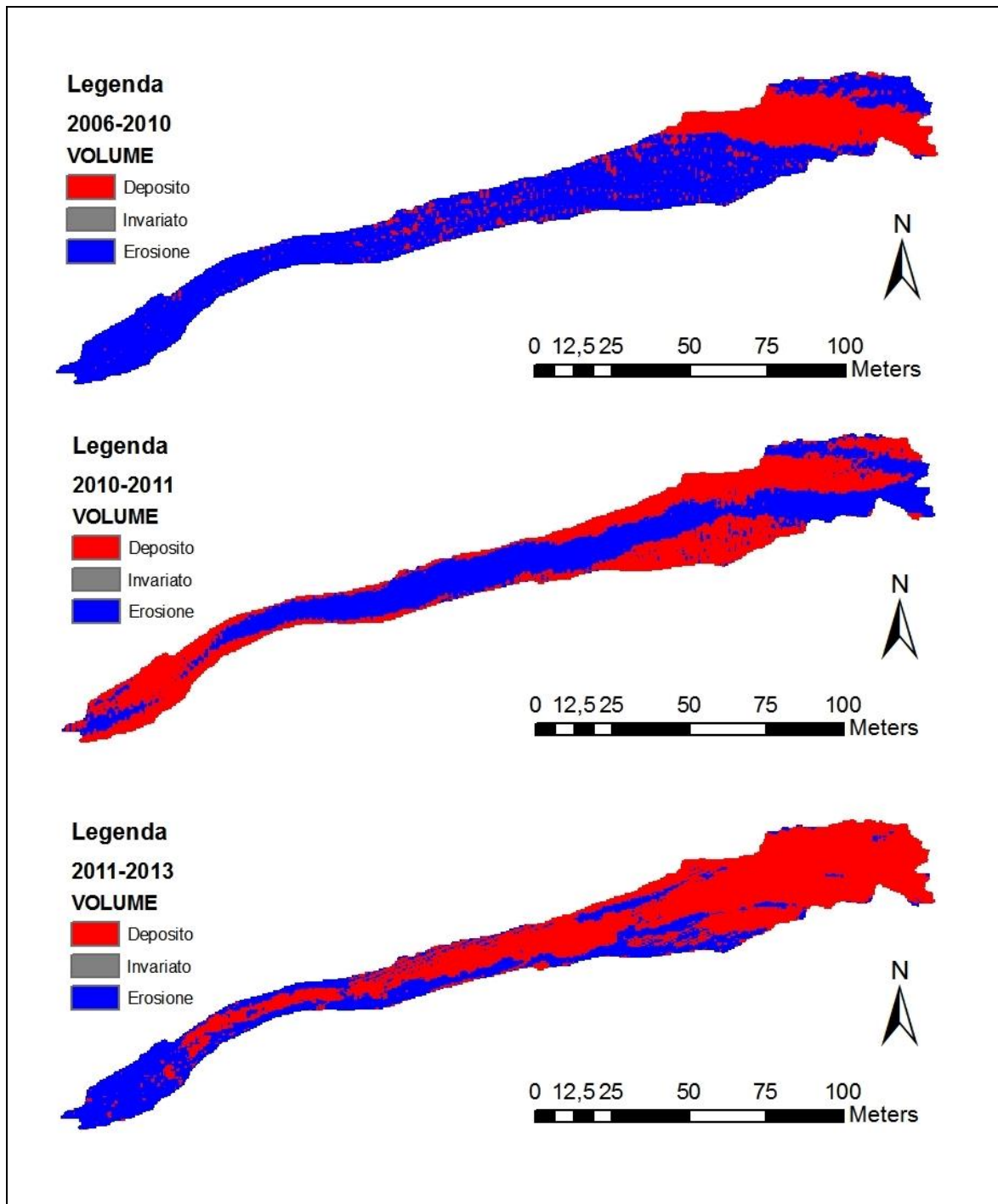


Fig. 7.8: Mappe di deposito-erosione del canale secondo le tre combinazioni

La tabella seguente (Tab. 7.3) riassume per ciascuna combinazione i volumi e gli spessori massimi di deposito ed erosione stimati per la zona del canale.

Combinazione	Volume Stimato (m ³)		Massimi Spessori (m)	
	Deposito	Erosione	Deposito	Erosione
ALS 2006 - ALS 2010 (canale)	1828	1913	-5	+21
	Totale: 3742			
ALS 2010 - ALS 2011 (canale)	1910	3210	-28	+4
	Totale: 5120			
ALS 2011 - TLS 2013 (canale)	3924	475	-10	+29
	Totale: 4398			

Tab. 7.3: Volumi e spessori massimi di deposito ed erosione del canale

Dall'analisi quantitativa effettuata è emerso che nella prima combinazione (ALS 2006 – ALS 2010) il volume di deposito all'interno del canale è stato di circa 1828 m³, mentre quello di erosione 1913 m³, per un totale di 3742 m³ di materiale mobilizzato. Dal rilievo ALS 2010 all'ALS 2011 i sedimenti mossi (5120 m³) aumentano rispetto i valori rilevati nella prima combinazione, con 1910 m³ depositati e 3210 m³ erosi. Nell'ultima combinazione (ALS 2011 – TLS 2013) si assiste a una leggera diminuzione del materiale mosso nel canale (4398 m³), anche se è marcata l'inversione di tendenze tra deposito (3924 m³) ed erosione (475 m³).

In tutte e tre le combinazioni non sono state registrate celle "invariate", ossia celle che non hanno subito nel corso del periodo in esame nessun fenomeno di erosione o deposito.

Per la realizzazione della mappa di deposito-erosione della parete rocciosa (ALS 2011 "ruotato" – TLS 2013 "ruotato") è stato mantenuto lo stesso criterio di classificazione delle precedenti (Fig. 7.9). Dal confronto tra i DTM relativi alle due epoche prese in esame sono state calcolate le variazioni volumetriche riportate in tabella 7.4.

Combinazione	Volume Stimato (m ³)		Massimi Spessori (m)	
	Deposito	Erosione	Deposito	Erosione
ALS 2011 – TLS 2013 (parete)	289	8941	-5	+14
	Totale: 9230			

Tab. 7.4: Volumi e spessori massimi di deposito ed erosione della parete rocciosa

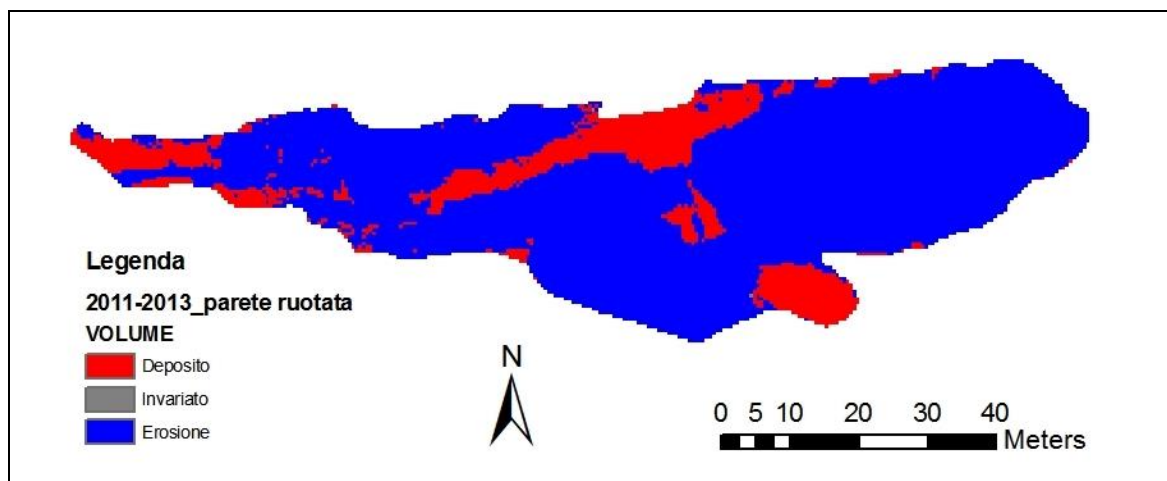


Fig. 7.9: Mappa di deposito-erosione della parete rocciosa (ruotata secondo l'asse y) relativa all'ultima combinazione ALS 2011 – TLS 2013

Anche in questo caso non sono state registrate celle “invariate”, cioè che non hanno subito nel corso del periodo in esame nessun fenomeno di erosione o deposito.

Da questi risultati si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Il crollo parziale della parete verticale avvenuto a luglio 2013 è stato di circa 8000 m³ effettivi di roccia; è ipotizzabile che parte degli 8941 m³ stimati provenga dalla testata del bacino idrografico.
- Come già evidenziato dalla mappa dei volumi della parete, il materiale franato non si è depositato ai piedi della parete (289 m³ di deposito a fronte di 8941 m³ erosi), ma è sceso verso valle probabilmente grazie alla sola forza di gravità e a fenomeni di trasporto solido di fondo (in quel periodo infatti non sono state riscontrate colate detritiche).
- A fronte di circa 8000 m³ di sedimenti erosi dalla parete, l'analisi volumetrica ha evidenziato nel periodo 2001 – 2013 una deposizione nel canale di soli 3924 m³ di materiale stabilizzato. Ciò vuol dire che non tutto il materiale detritico prodottosi dal crollo della parete (8000 m³) è stato convogliato nel “nuovo” canale “c08”. Molto probabilmente i rimanenti 4000 m³ di sedimenti liberati dal crollo sono finiti nel “vecchio” canale o si sono sparsi a destra e sinistra dell'area in esame, comunque in zone non rilevate con il *laser scanner* terrestre nel 2013.

In conclusione, sommando i volumi mobilizzati dalla parete verticale con quelli del canale, relativi sempre al periodo ALS 2011 – TLS 2013, si ottengono i seguenti risultati complessivi per l'area di studio (Tab. 7.5, Fig. 7.10).

Combinazione	Volume Stimato (m ³)	
	Deposito	Erosione
ALS 2006 – ALS2010 (canale)	1828	1913
	Totale: 3742	
ALS 2010 – ALS 2011 (canale)	1910	3210
	Totale: 5120	
ALS 2011 – TLS 2013 (canale + parete)	4213	9415
	Totale: 13628	

Tab. 7.5: Volumi di deposito ed erosione totali

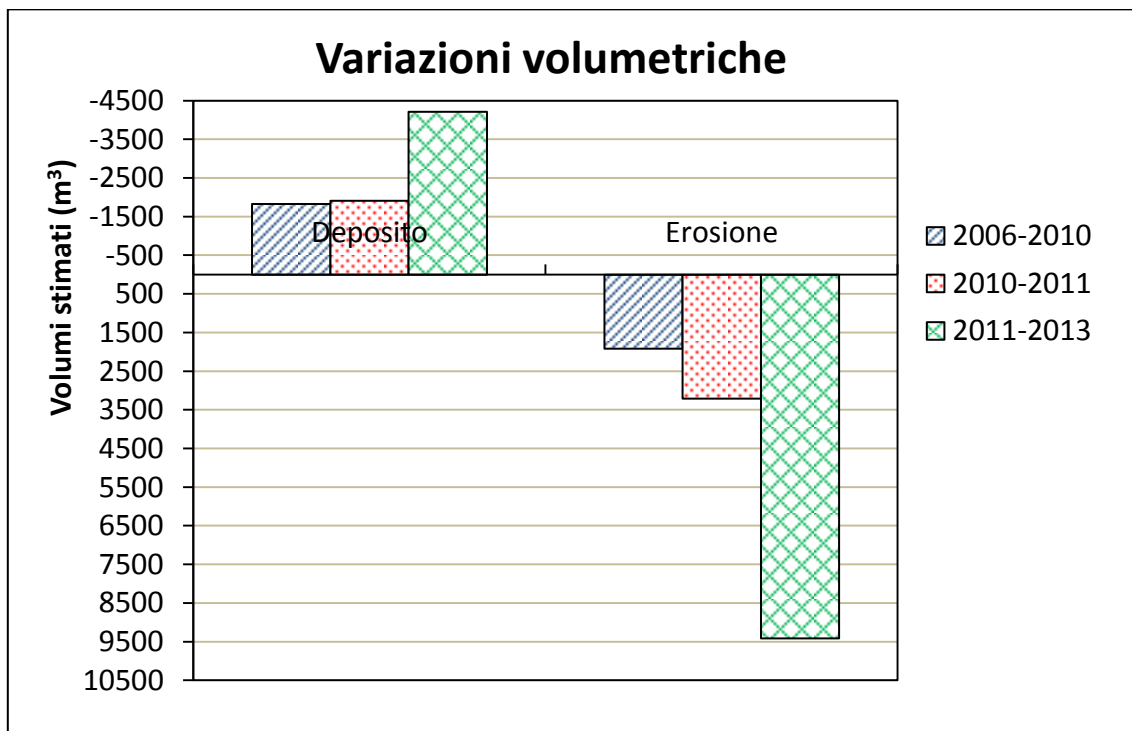


Fig. 7.10: Mappe di deposito-erosione a confronto

I volumi di deposito ed erosione dei primi due periodi sono dovuti a soli eventi di *debris flow* (uno nella prima combinazione, e tre nella seconda), mentre i forti incrementi di volume tra il rilievo ALS 2011 e il TLS 2013 sono conseguenza del crollo parziale della parete rocciosa avvenuto a luglio 2013.

7.3.1 Analisi del DTM 2010

Dall'analisi volumetrica conclusiva sono parsi leggermente fuori scala i valori di deposito ed erosione stimati per il primo periodo ALS 2006 – ALS 2010. Nonostante la dinamica morfologia sia

confermata dalla cronologia degli eventi che hanno interessato il canale “c08”, appare strano un così alto valore di volume mobilizzato (3742 m^3) a fronte di un solo ipotetico evento di *debris flow*. Nel secondo periodo (ALS 2010 – ALS 2011) infatti si registrano 5120 m^3 mobilizzati ma da ben 3 eventi di colata. Si è deciso dunque di analizzare in dettaglio le nuvole di punti LiDAR del 2006 e 2010 per escludere errori nella modellazione del terreno.

Importando i dati *input* in CloudCompare e ponendo la vista in modo che l'asse Z (blu) sia diretto verso l'alto, l'asse X (rosso) sia parallelo al bordo inferiore della finestra 3D e l'asse Y (verde) sia circa "entrante" nello schermo (Fig. 7.11) si nota che nell'area del nuovo “canale” i punti del terreno relativi al ALS 2006 (di colore bianco) "salgono" da sinistra a destra in modo naturale e lineare, invece per il 2010 (di colore rosso) la variazione avviene in modo innaturale, “scalettata”.

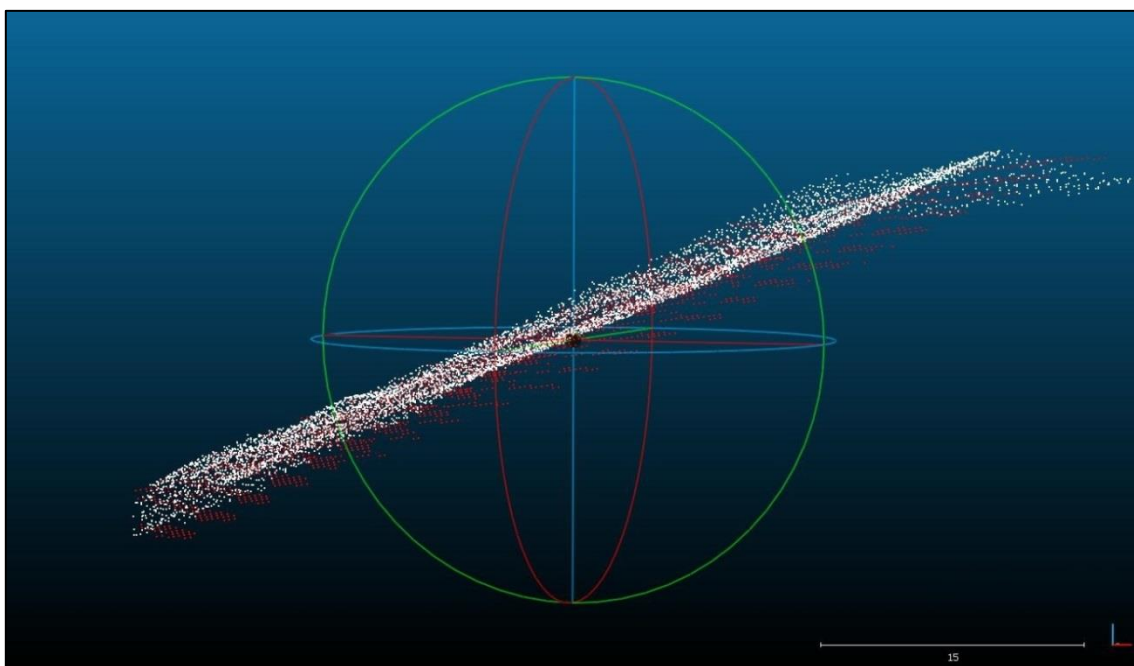


Fig. 7.11: LiDAR 2006 e LiDAR 2010 a confronto in CloudCompare

L'andamento di quest'ultima nuvola di punti (ALS 2010) è riconducibile alle curve di livello iniziali da cui poi sono stati estratti i punti in questione. A causa dell'effetto di “scalettatura”, in corrispondenza di ogni singola isoipsa (curva di uguale quota) i punti del rilievo LiDAR ALS del 2010 risultano essere disposti su piani orizzontali, ad intervalli di quota di 1 m l'uno dall'altro. Per ciascuno di tali piani (o isoipsa) si è venuta quindi a creare una erronea differenza tra i punti del 2006 e quelli del 2010, non rappresentativa (per il 2010) del reale andamento del terreno. Di conseguenza anche il DTM 2010 prodotto in ArcGIS non è attendibile e similmente accade per i volumi di erosione e deposito calcolati nel periodo 2006-2010 e 2010-2011. Sulla base di questa

conclusione i risultati delle analisi volumetriche esposti in precedenza per il primo e secondo periodo sono stati scartati.

Riassumendo, per lo studio delle variazioni volumetriche dei sedimenti mobilizzati lungo il nuovo corso del canale "c08" sono stati condotti sui seguenti due DoD LiDAR:

1. DTM (ALS) 2006 – DTM (ALS) 2011;
2. DTM (ALS) 2011 – DTM (TLS) 2013.

Per il nuovo periodo ALS 2006 – ALS 2011 è stata determinata la “mappa dei volumi” e quella di “deposito-erosione” alle quali sono state assegnate gli stessi modelli di colorazione delle mappe precedenti (Fig 7.12).

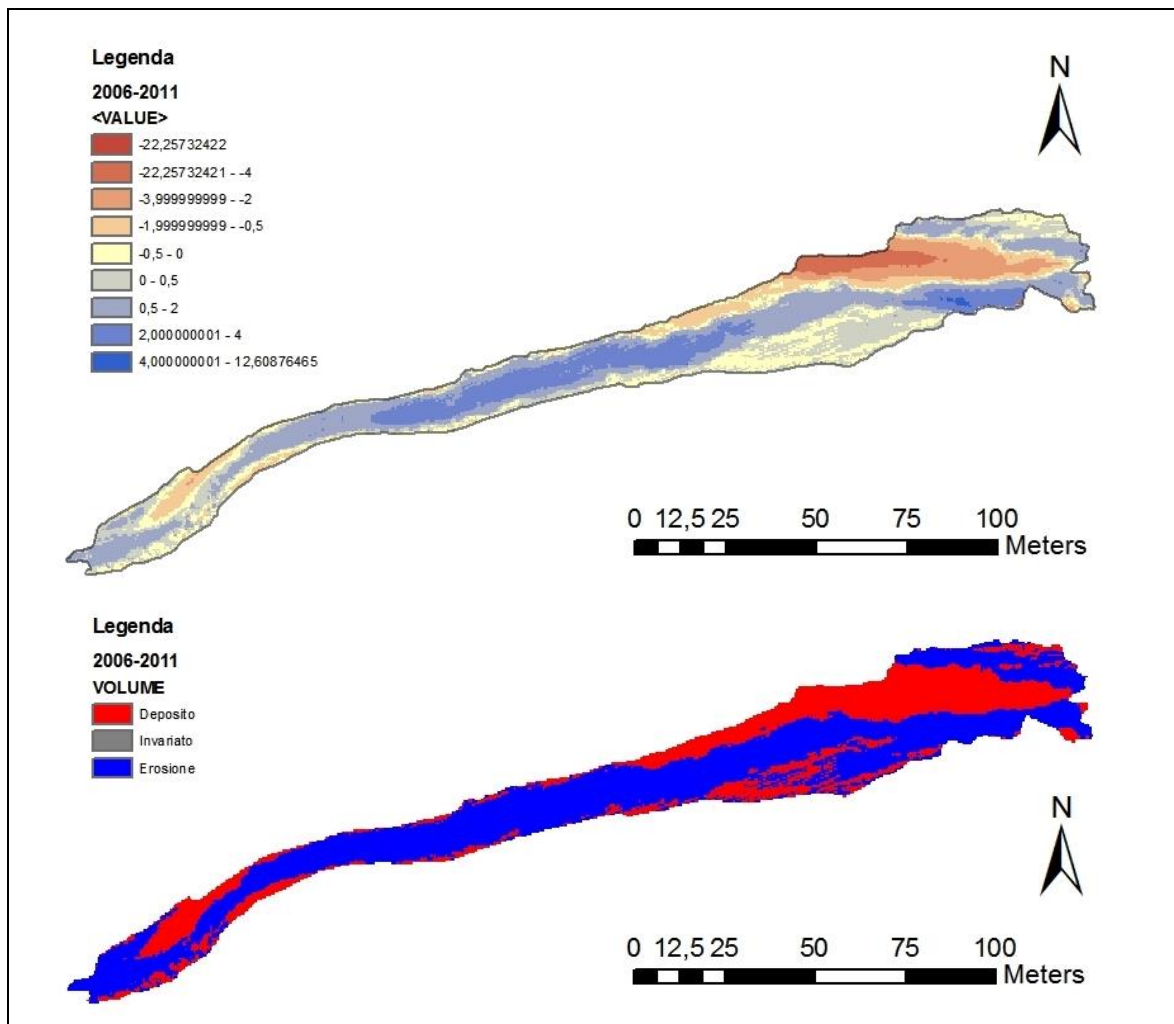


Fig. 7.12: Mappa dei “volumi” e di “deposito-erosione” del periodo ALS 2006 – ALS 2011

Dai risultati volumetrici ottenuti (Tab. 7.6, Fig. 7.13) è emerso che nella prima combinazione (ALS 2006 – ALS 2011) il volume di deposito all’interno del canale è stato di circa 2521 m³, mentre quello di erosione 3907 m³, per un totale di 6428 m³ di materiale mobilizzato in cinque anni.

Nell'ultima combinazione (ALS 2011 – TLS 2013) si assiste ad un incremento di questi valori che raggiungono i 4213 m³ di materiale depositato e i 9415 m³ di sedimento eroso (totale mobilizzato: 13628 m³). Anche qui non sono state registrate celle "invariate", cioè che non hanno subito nel corso del periodo in esame nessun fenomeno di erosione o deposito.

Combinazione	Volume Stimato (m ³)	
	Deposito	Erosione
ALS 2006 – ALS 2011 (canale)	2521	3907
	Totale: 6428	
ALS 2011 – TLS 2013 (canale + parete)	4213	9415
	Totale: 13628	

Tab.7.6: Volumi di deposito ed erosione totali

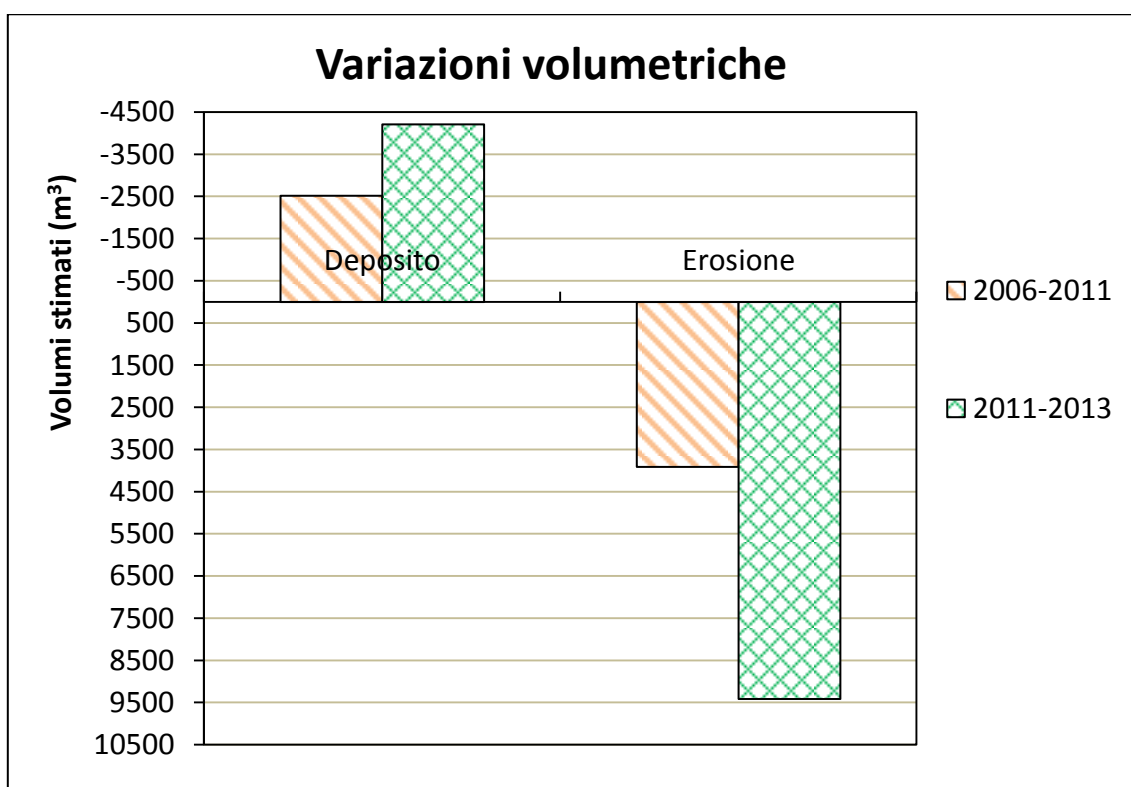


Fig. 7.13: Mappe di deposito-erosione a confronto

I volumi così stimati per il primo periodo possono essere non del tutto veritieri in quanto l'arco temporale di analisi risulta essere molto grande (5 anni), rispetto alla seconda combinazione (1 anno).

7.4 Sezioni

In corrispondenza di alcune sezioni rilevate con il GPS nel luglio 2011 (Fig. 7.14) sono state estratte altrettante sezioni dal DTM (ALS) del novembre 2011, i cui profili sono illustrati nelle figure 7.15 - 7.22. Il confronto tra questi profili evidenzia le variazioni morfologiche dell'alveo per effetto degli eventi di *debris flow* avvenuti ad agosto 2011.

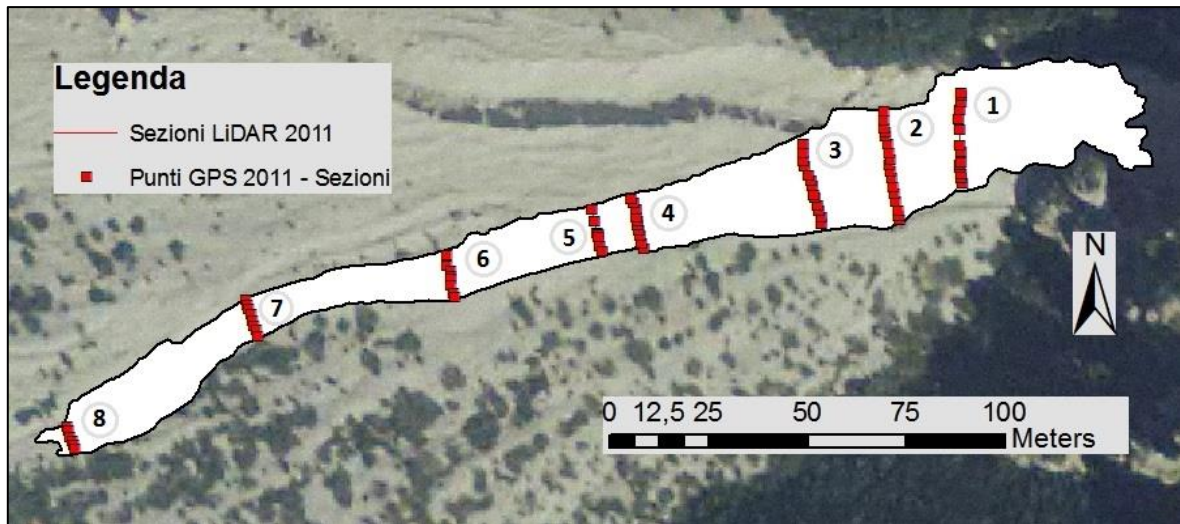


Fig. 7.14: posizione delle sezioni GPS 2011

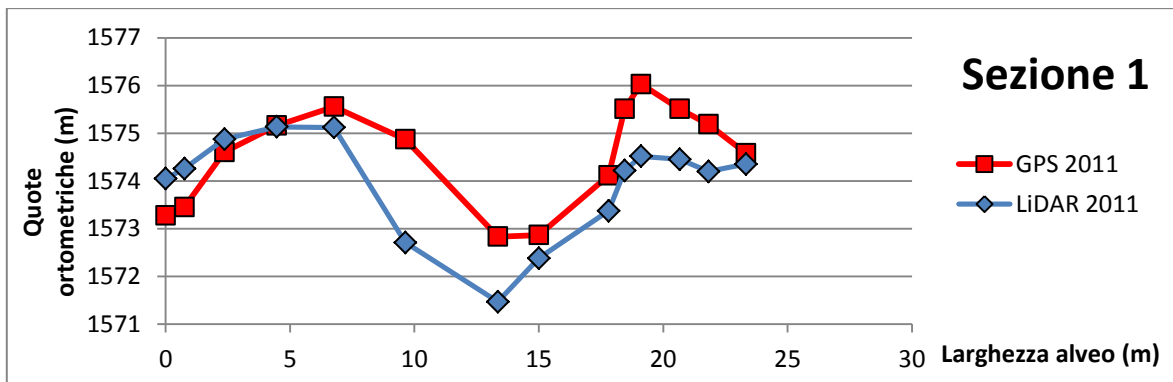


Fig. 7.15: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 1

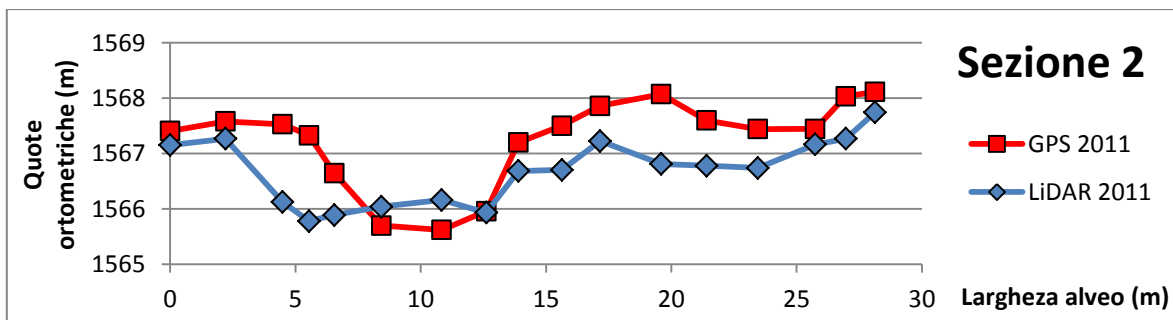


Fig. 7.16: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 2

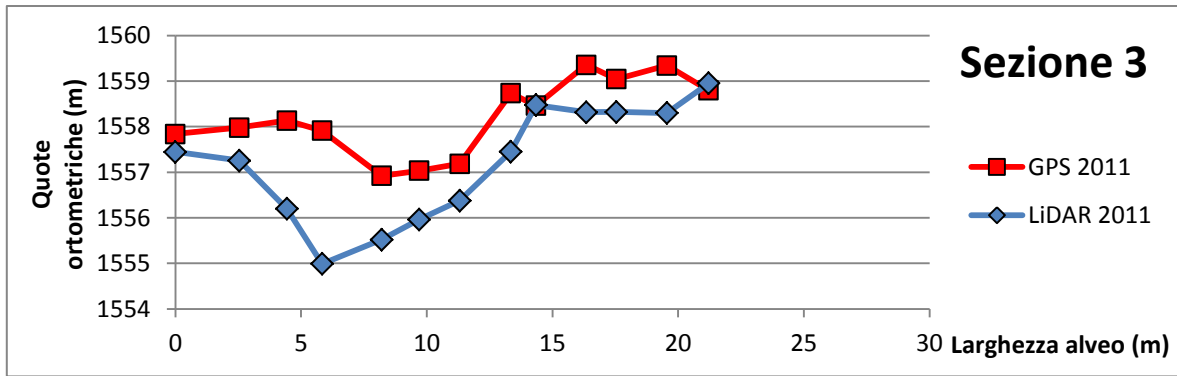


Fig. 7.17: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 3

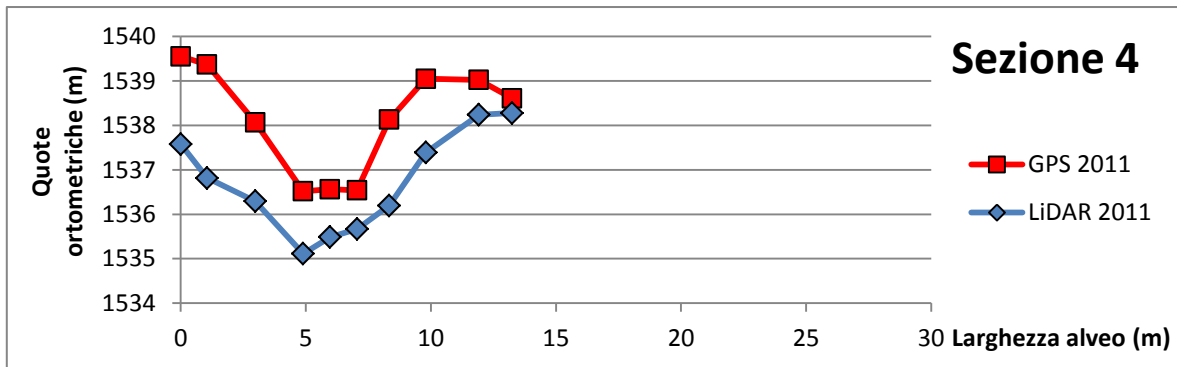


Fig. 7.18: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 4

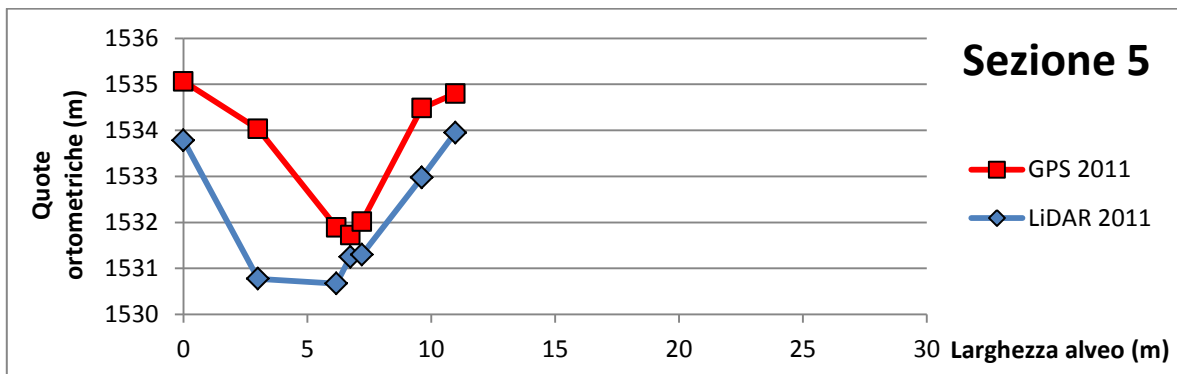


Fig. 7.19: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 5

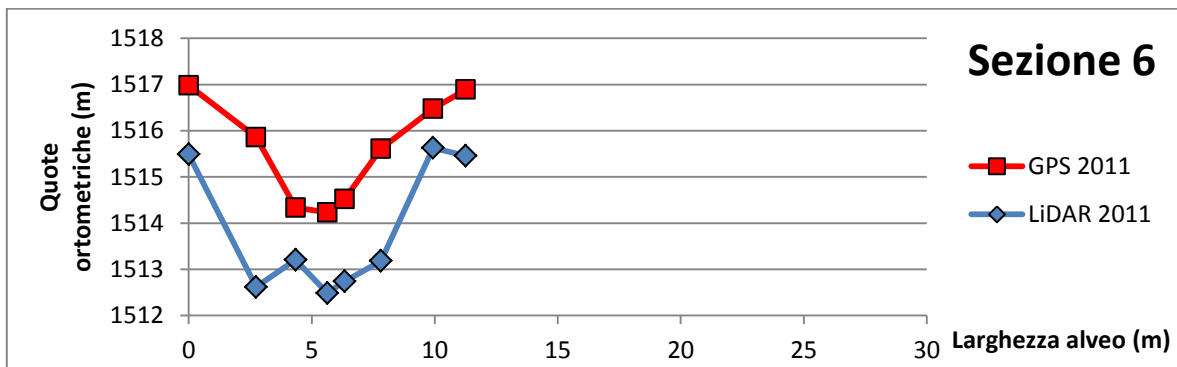


Fig. 7.20: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 6

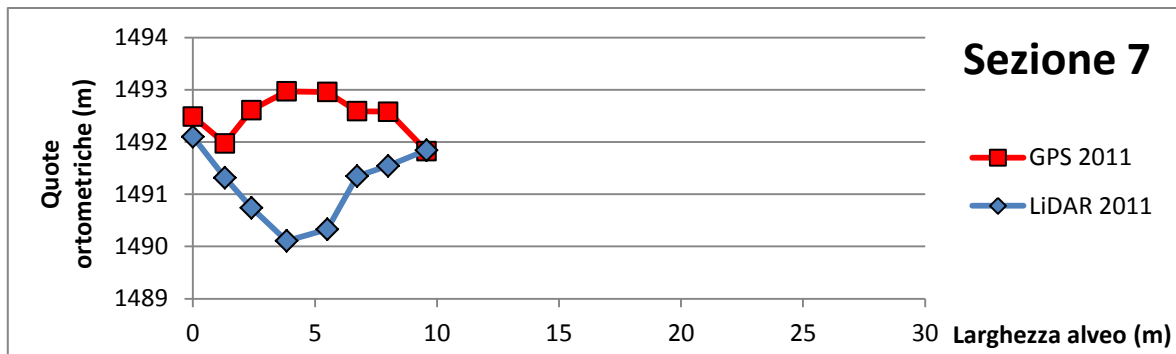


Fig. 7.21: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 7

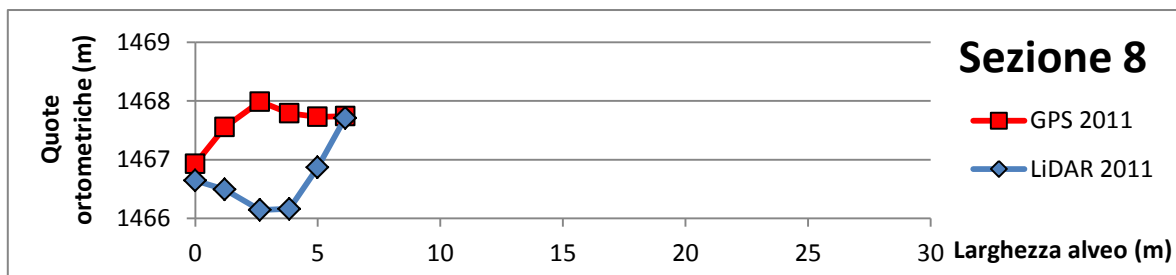


Fig. 7.22: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione 8

Le otto sezioni confermano che i due eventi di colate detritiche avvenuti ad agosto 2011 hanno scavato il letto del canale. Nel tratto iniziale l'incisione è in misura inferiore rispetto alla parte conclusiva dove arriva anche a 2 metri (Sezione 7 e 8).

Ulteriori confronti sono stati effettuati tra sezioni GPS rilevate ad Agosto 2010 (relative alla prima parte del canale) ed a metà luglio 2011, in zone molto prossime tra loro ma non coincidenti (Fig7.23). Infatti a causa dell'elevata instabilità superficiale dell'area oggetto di studio, nel 2010 non è stato possibile posizionare in loco dei riferimenti fissi in corrispondenza delle sezioni misurate, in modo da poter rimisurare le stesse in epoche successive. In aggiunta, attraverso queste sezioni GPS sono state estratte altrettante sezioni dai DTM ALS del 2011 e TLS del 2013 in modo da poter analizzare anche gli effetti che hanno avuto gli eventi di *debris flow* occorsi nell'agosto 2011 e il crollo parziale della parete rocciosa verticale avvenuto a luglio 2013 (Fig. 7.24, 7.25, 7.26, 7.27).

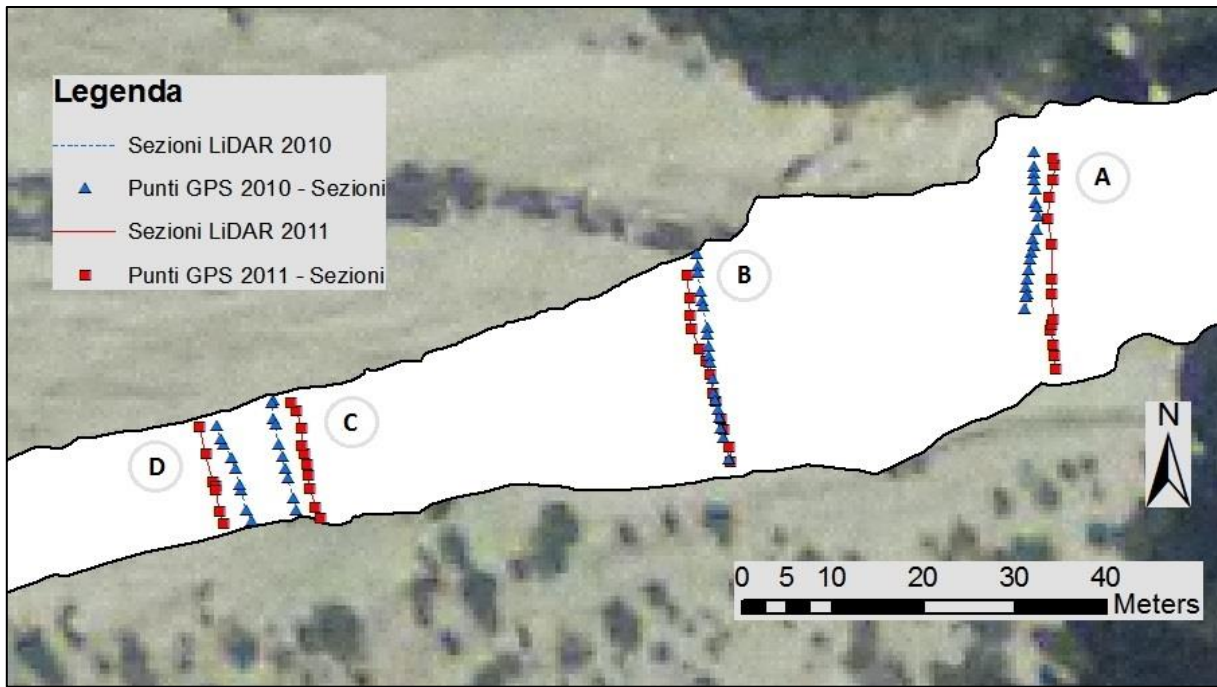


Fig. 7.23: Posizione delle sezioni confrontate

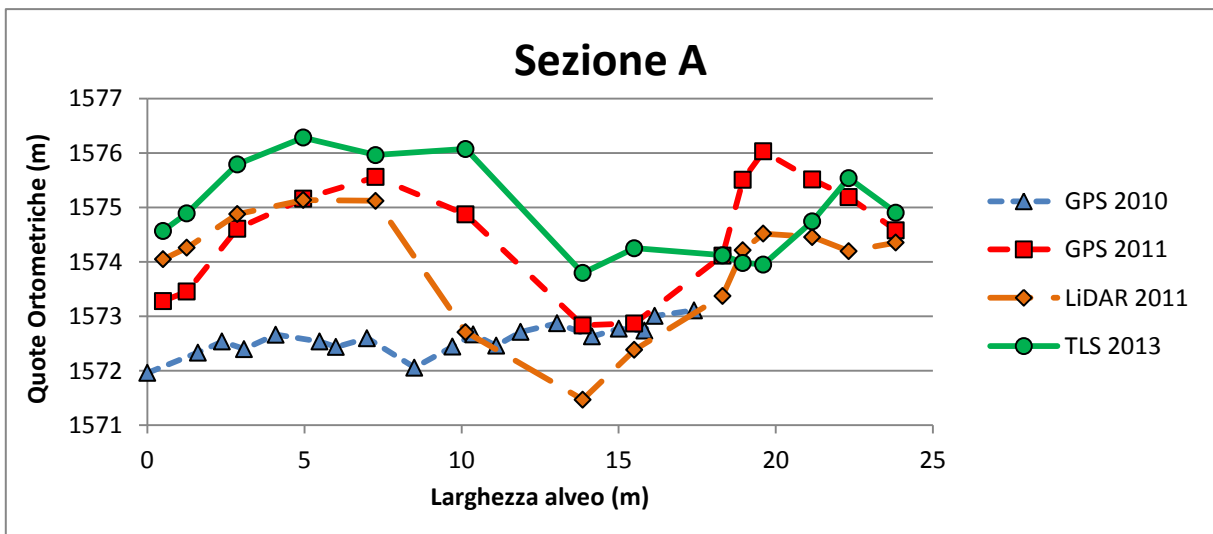


Fig. 7.24: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione A

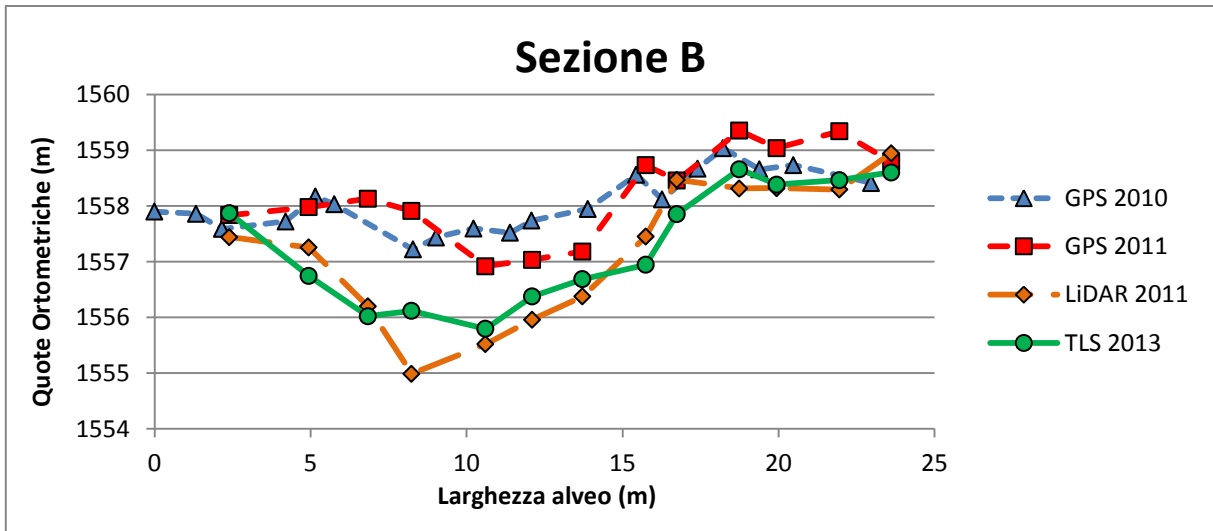


Fig. 7.25: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione B

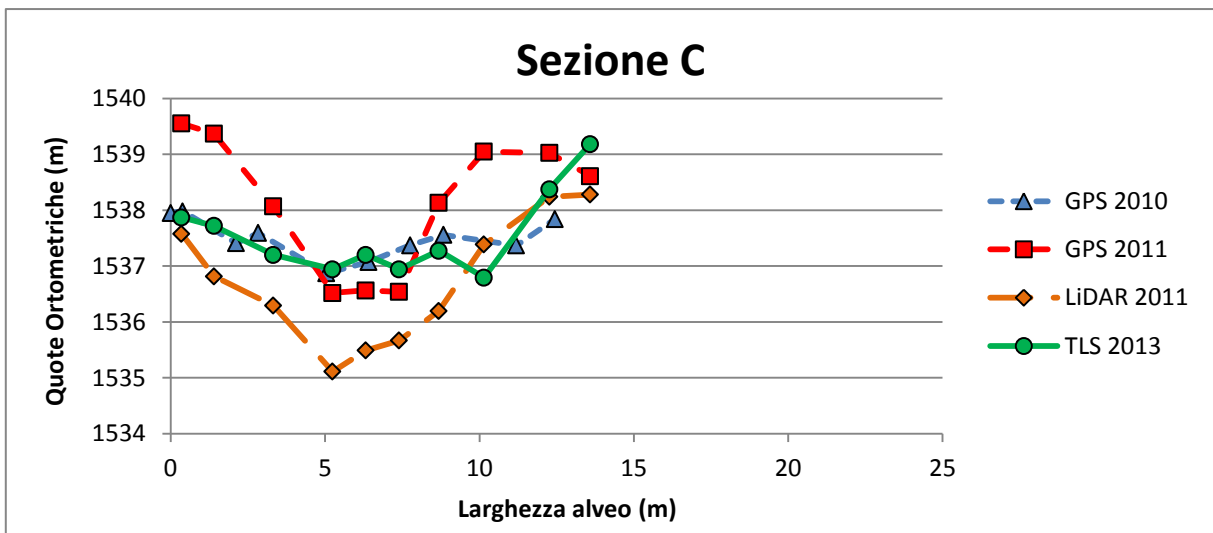


Fig. 7.26: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione C

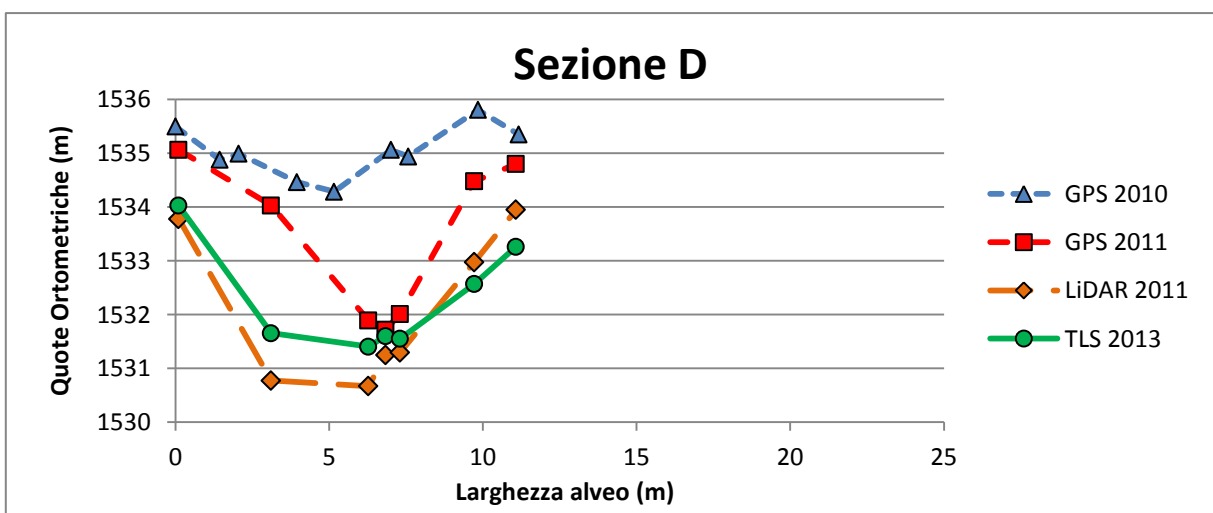


Fig. 7.27: Variazione morfologica dell'alveo – Sezione D

Le quattro sezioni (A, B, C, D) hanno, di fatto, confermato per il primo tratto:

- Il cambio di direzione del canale a seguito dell'evento di luglio 2011, che trovandosi occluso il vecchio percorso ha scavalcato la sponda in sinistra idrografica (Sezione A) e scavato il "nuovo" corso incidendo lo strato superficiale dei depositi detritici sottostanti (Sezione D) o depositando sedimenti ai lati in modo da creare dei nuovi argini (Sezione C);
- Gli eventi di colata di agosto 2013 hanno scavato ulteriormente il letto del canale (Sezione A, B, C, D);
- Il crollo parziale della parete rocciosa avvenuto a luglio 2013 ha liberato nel canale diversi metri cubi di sedimento (Sezione A, B, C, D).

Le divergenze agli estremi delle sezioni in prossimità delle sponde si spiegano con il fatto che, nonostante si siano considerate sezioni più possibilmente corrispondenti dei due rilievi GPS, queste non siano perfettamente sovrapposte per il motivo già precedentemente esposto.

8. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti da questo lavoro evidenziano le enormi potenzialità dell'utilizzo della tecnologia LiDAR per:

- il rilievo di zone impervie e di difficile accesso;
- restituire modelli tridimensionali utili allo studio e al monitoraggio di canali soggetti a fenomeni di *debris flow*;
- eseguire analisi volumetriche sul materiale mobilizzato dalle colate detritiche.

Il rilievo TLS consente di avere un dettaglio elevato anche se su un'area molto ristretta, inoltre il in zone complesse o caratterizzate da forti variazioni morfologiche (es. presenza di grossi massi nel canale) richiede l'esecuzione delle scansioni da più stazioni con possibili problemi di spostamento della stazione e dei *target* e allungamento dei tempi di misura. Viceversa con il rilievo ALS è più facile cogliere l'area di interesse nel suo complesso, benché ad un livello di dettaglio inferiore.

L'analisi volumetrica del canale "c08" è stata fatta con un approccio multiscala, ovvero utilizzando *datasets* con diversa risoluzione spaziale a terra: 50 pti/m^2 per TLS, media di 4 pti/m^2 per ALS. Ciò ha fatto sì che una buona parte dell'informazione contenuta nei dati TLS non sia stata adeguatamente sfruttata e che i volumi quantificati sui rilievi ALS presentino alcune imprecisioni a causa delle modeste risoluzioni dei dati *laser*.

L'integrazione in questo studio dei dati GPS con quelli LiDAR non ha potuto né migliorare il dettaglio dei rilievi *laser scanner* né permettere un confronto degli errori tra i due metodi di acquisizione perché questi sono stati intervallati l'uno con l'altro da fenomeni di colate detritiche o dal crollo parziale della parete rocciosa che hanno alterato la superficie del terreno. Per ovviare a questo le acquisizioni con GPS andrebbero svolte in tempi il più possibili ravvicinati agli eventi di colata o ai rilievi LiDAR in modo da ottenere misure più coerenti con la situazione reale.

Lo studio ha anche mostrato la vera complessità di un'analisi con rilievi ALS e TLS, sottolineando per ognuna delle fasi dell'intervento le problematiche che devono essere affrontate e risolte. È bene quindi analizzare i dati non solo con software di modellazione 2D, ma anche 3D per escludere eventuali errori nella rappresentazione del terreno. Purtroppo non si ha ancora a disposizione un'applicazione integrata che possa rispondere appieno a tutte le problematiche che un rilievo LiDAR pone dal suo progetto fino all'elaborazione dei risultati finali; ancora oggi l'elaborazione dei dati acquisiti richiede spesso l'utilizzo di diversi *software* con i consueti problemi di compatibilità dei formati dei dati. È evidente che sia il progetto quanto l'esecuzione delle misure e la successiva

elaborazione dei dati non possono essere eseguiti con il necessario rigore se non da personale esperto con una buona formazione nell'ambito delle discipline della Geomatica.

Per completare l'analisi sarebbe opportuno verificare l'effettivo innesco e transito della colata detritica ipotizzata tra il rilievo ALS 2006 e ALS 2010, e studiare anche le zone adiacenti il "nuovo canale" per ottenere maggiori informazioni sul fenomeno di crollo della parete rocciosa avvenuto nel 2013.

BIBLIOGRAFIA

- Baltasvias E.P. (1999). *“Airborne laser scanning: basic relations and formulas”*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (2-3): 199-214.
- Besl P. J., McKay N. D., 1992. *“A method for registration of 3-D shapes”*. IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell., 4(2): 239–256.
- Bornaz L. (2004). *“I sistemi a scansione laser - Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione”*. Seminario “La Tecnica del Laser Scanning Terrestre), Udine, 24-26 novembre 2004.
- Castiglioni G.B. (1971). *“Le calamità naturali nelle Alpi”*. Estratto dagli Atti del XXI Congresso Geografico Italiano. Verbania, 1971. Padova: Istituto di Fisica Terrestre, Geodesia e Geografia Fisica; pubblicazione n. 195.
- Casula G., Curuni M., Pesci A., Bianchi M. G. (2010). *“Apporti tecnici: Linee guida sul Trattamento Dati Laser a Scansione Terrestre mediante software Leica Cyclone Versione 7”*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Editoriale Nazionale – INGV.
- Censi M. (2013). *“Le tipologie del larice a Cortina D’Ampezzo: considerazioni ecologico-selvicolturali”*. Tesi di Laurea Magistrale, Università degli studi di Padova, Facoltà di Agraria, Italia.
- Cesca M. (2008). *“Studio dei meccanismi di deposizione dei debris flow: integrazioni tra esperienze di laboratorio, analisi di campo e modellazioni numeriche”*. Tesi di Dottorato, Università degli studi di Padova, Italia.
- CIRGEO (2011). Dispense *“Sistemi di posizionamento globale satellitare”*, Università di Padova.
- Coe J.A., Cannon, S.H., Santi P.M. (2008 a). *“Introduction to the special issue on debris flows initiated by runoff, erosion, and sediment entrainment in western North America basins”*. Geomorphology, 2008, 96, 247-249.
- Coe J.A., Kinner D.A., Godt J.W. (2008 b). *“Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado”*. Geomorphology, 2008, 96, 270-297.
- Crucil G., 2013. *“Monitoring and modeling of the debris flows in the Fiames area”*. Tesi di Laurea magistrale, Università degli Studi di Padova, Italia.

- D’Agostino V. (2014). Materiale didattico e appunti delle lezioni di “Protezione dal rischio idrogeologico” del corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali. Università degli Studi di Padova.
- Filippi F. (1985). *“Atlante del territorio silvo pastorale delle Regole e del Comune di Cortina d’Ampezzo”*. Cassa rurale artigiana di Cortina d’Ampezzo, Primiero (TN), pp.
- Fusiello A., Castellani U., Ronchetti L., Murino V., 2002. *“Model acquisition by registration of multiple acoustic range views”*. Computer Vision – ECCV 2002, LNCS vol. 2351, Springer.
- Genevois R., Berti M., Ghirotti M., Simoni A., Tecca P.R. (1999). *“Debris flow monitoring and analysis in the dolomitic region (Upper Boite Valley, Italian Alps)”*. Thematic report, EC project, ENV4. CT96, 253.
- Gregoretti C., Dalla Fontana G. (2007). *“Rainfall thresholds for the initiation of debris flows by channel bed failure of the Dolomites”*. In Proceedings of the Fourth International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation Cheng-du, August, Chen and Major (eds): 11-21.
- Gregoretti C., Dalla Fontana, G. (2008). *“The triggering of debris flow due to a channel-bed failure in some alpine headwater basins of the Dolomites: analyses of critical runoff”*. Hydrological Process, 2008, 22, 2248-2263.
- Gregoretti C., Degetto M., Crucil G., Pimazzoni A., Berti M., Simoni A., De Vido, G. (2012). *“Monitoraggio dei deflussi superficiali in un canale roccioso inciso sul campanile Dimai a Fiames (Cortina d’Ampezzo, BL)”*. Analisi preliminari sottomesso al XXXIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche - Brescia 10-15 Settembre 2012.
- Griffiths P.G., Webb R.H., Melis T.S. (2004). *“Frequency and initiation of debris flows in Grand Canyon, Arizona”*. Journal of Geophysical Research, 2004, 109.
- Lichti D.D., Jamtsho S. (2006). *“Angular resolution of terrestrial laser scanners”*, The Photogrammetric Record, 21:141-160.
- Milan N. (2012). *“Comparazione di differenti tecniche di acquisizione dati per la produzione di DTM per modelli idrogeologici”*. Tesi di Dottorato, Università degli studi di Padova, Italia.
- Niccoli T., 2007. *“Introduzione al software ArcGIS 8.3”*. CopyLeft 2007.
- Pirotti F., 2009. *“La tecnologia lidar per applicazioni forestali”*. Sherwood, Foreste ed alberi oggi, 156: 7-15.

- Rinaudo F., 2003. *“La tecnica laser scanning: applicazioni architettoniche e urbanistiche”*, pubblicato nel volume Crosilla F., Galetto R. *“La tecnica laser scanning - Teoria e applicazioni”* (pp. 157-172). Udine: CISM (Italy).
- Romanel L. (2012). *“Analisi geo-idrologica del bacino del Rudavoi e delle condizioni di innesco delle colate detritiche”*. Tesi di Laurea triennale, Università degli Studi di Padova, Italia.
- Rosson N. (2014). *“Determinazione delle variazioni morfologiche dell’alveo del canale Dimai a Fiames (Cortina d’Ampezzo - BL), a seguito del verificarsi il 18/08/2011 di una colata”*. Tesi di Laurea triennale, Università degli Studi di Padova, Facoltà di Agraria, Italia.
- Scheidl C., Rickenmann D. & Chiari M. (2008) . *“The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland”*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 8, 1113 - 1127.
- Tecca P.R., Genevois R. (2009). *“Field observations of the June 30, 2001 debris flow at Acquabona (Dolomites, Italy)”*. Landslide, 2009.
- Tonini A. (2006). *“Metodologia per la creazione di modelli geologici 3D sulla base di dati di superficie : applicazione nello studio preliminare di gallerie ferroviarie nell'area Roccaccia-Acqua Bianca (Valtopina, Umbria)”*. Tesi di Dottorato , Università degli Studi di Siena.