

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

- Dipartimento Territorio e Sistemi Agro Forestali -

Scuola di Dottorato di Ricerca in:

Territorio, Ambiente, Risorse e Salute

Indirizzo:

Idronomia Ambientale - XXIII ciclo

COMPARAZIONE DI DIFFERENTI TECNICHE DI ACQUISIZIONE DATI PER LA PRODUZIONE DI DTM PER MODELLI IDROGEOLOGICI

Direttore della Scuola: Ch.mo Prof. MARIO ARISTIDE LENZI

Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof. MARIO ARISTIDE LENZI

Supervisore: Ch.mo Prof. ANTONIO VETTORE

Dottorando: NICOLA MILAN

CAPITOLO 1.

ABSTRACT - SOMMARIO

1.1 ABSTRACT

In this work we present the results related to several field campaigns conducted in the last three years in a small (4.4 km²) wilderness basin in Carnia, a tectonically active alpine region in northeast Italy. The study area is a typical alpine debris-flow dominated catchment (Tarolli and Tarboton, 2006; Tarolli and Dalla Fontana, 2009), where several landslides, including a large one, were observed and mapped. The field survey carried out in 2007, 2008, 2009 and 2010 were focused on the large landslide of the basin and they consisted in: 1) development of an accurate GPS network, 2) use a long range Terrestrial Laser Scanner (TLS) for a detailed and local analysis of landslide movements, 3) merge the data with an airborne LiDAR for a large scale of analysis of the processes. Preliminary analysis consisted in the comparison of different high resolution Digital Terrain Models (DTMs) in order to estimate the debris volume that has been triggered during the last movements of the landslides. Achieved results show that the integration between ALS and TLS data allows to produce DTMs of limited extent, with higher quality and level of detail. Such DTMs improve the capabilities for landslides analysis and modeling with respect to the use of LiDAR data only, even in areas providing limited or difficult access to surveying activities.

1.2 SOMMARIO

In questa tesi si presentano i risultati relativi al calcolo del volume di materiale detritico coinvolto nella riattivazione di una grossa frana verificatasi nel 2004 presso il bacino del Miozza, un'area di circa 10.7 km² situata nella regione alpina della Carnia. La stima del volume di materiale detritico è stata ottenuta attraverso il confronto tra il DTM derivato da un rilievo LiDAR aereo (ALS) effettuato su tale area nel 2003 ed il DTM ottenuto da misure laser scanner terrestre (TLS), eseguite nella primavera del 2008 mediante Riegl LMS-Z620. I risultati ottenuti in questo lavoro dimostrano che attraverso l'integrazione di rilievi LiDAR aerei con misure da laser scanner terrestre è possibile produrre DTM di qualità e dettaglio superiori, benchè su aree più ristrette, migliorando localmente le capacità di analisi e modellazione di eventi franosi rispetto a quanto ottenibile con sole misure ALS, operando anche in zone impervie o di difficile accesso.

CAPITOLO 2.

**INTRODUZIONE:
PROBLEMATICHE, OBIETTIVI DELLA TESI
E STRUTTURAZIONE DEI CAPITOLI SEGUENTI**

2. INTRODUZIONE

Tra le aree sorgenti di sedimento assumono particolare significato i collassi di versante per instabilità superficiale che interessano prevalentemente i terreni sciolti della copertura eluvio-colluviale, tali dissesti sono particolarmente temibili in quanto passibili di evolvere in colate detritiche incanalate entro le incisioni torrentizie di ordine inferiore, interessando la rete viaria ed abitazioni. L'azione innescante è attribuibile in genere all'elevato afflusso meteorico che si viene ad infiltrare negli strati più superficiali del suolo, non smaltibile altrettanto celermente nelle parti più profonde e meno permeabili o attraverso il substrato roccioso. Il materiale instabilizzato viene successivamente trasferito, almeno in parte, al reticolo idrografico ed alimenta il trasporto solido, influenzando la dinamica temporale della propagazione del sedimento lungo la rete di drenaggio e la morfologia stessa dell'alveo. La possibilità di identificare la maggiore o minore suscettibilità di collasso superficiale nel sistema dei versanti di un bacino idrografico si rivela quindi importante sia al fine di una politica di prevenzione del rischio che per una corretta valutazione del bilancio dei sedimenti a scala di bacino.

2.1 AREA DI STUDIO

L'area di studio considerata riguarda il bacino del Miozza situato nel comune di Ovaro, a circa 20 km a Nord-Ovest di Tolmezzo (UD), nella Carnia, regione alpina ai confini con Austria e Slovenia (Fig. 1). Il bacino si estende su una superficie di circa 10.7 km² lungo la quale l'elevazione varia tra 470 m e 2075 m s.l.m., con una media di 1244 m s.l.m. La pendenza presenta un valore medio di circa 33° con un massimo di 77° rilevato nella zona di testata del bacino (Fig. 2). Si tratta di un'area priva di abitazioni; la presenza dell'uomo è limitata alla sola attività silvopastorale. La regione presenta un clima tipico delle Alpi Nord Orientali con brevi periodi di siccità rilevati per lo più durante l'inverno e l'estate e una precipitazione media annuale superiore ai 2000 mm. Si tratta di una delle aree più piovose dell'Italia. Il deflusso durante i mesi di maggio e giugno è dominato dai processi di scioglimento delle nevi. Durante gli eventi meteo più intensi sono comuni fenomeni come le piene improvvise, colate detritiche e processi di instabilità alveo versante. La vegetazione interessa il 94% dell'area

di studio e consiste in foresta ad alto fusto (74%), arbusti (10%), e pascolo di alta quota (10%); il rimanente 6% è rappresentato da formazioni rocciose, detrito e frane.

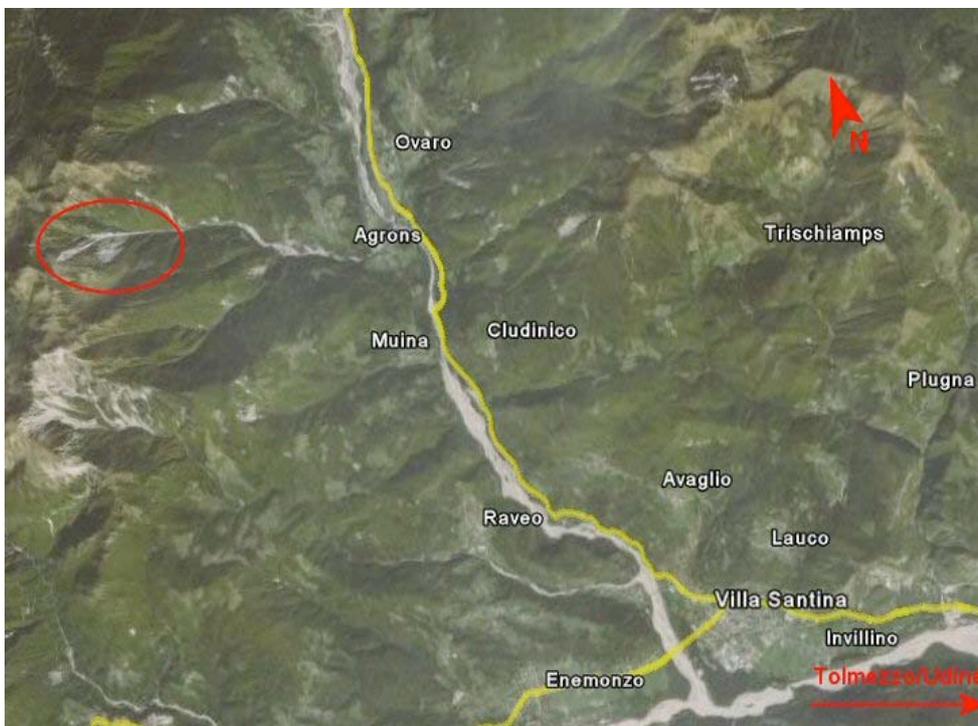


Figura 2.1: Il bacino del Miozza in Carnia.



Figura 2.2 : Vista dell'area di frana da Nord.

Questo bacino è stato scelto come area di studio in quanto oltre a presentare numerose zone soggette a processi di dissesto superficiale, è anche disponibile un sistema informativo territoriale contenente dati aggiornati sull'uso del suolo, la morfologia, la topografia del luogo ed un database informativo relativo ai dissesti accaduti negli ultimi anni. Inoltre per tale bacino sono stati sviluppate negli anni recenti diverse applicazioni di modellazione idraulica (Tarolli e Tarboton, 2006; Tarolli e Dalla Fontana, 2008). La maggior parte delle aree di dissesto sono localizzate in testata del bacino, in particolare quella più ampia copre da sola un'estensione di 22 ettari (Fig. 2) e costituisce la più attiva e principale sorgente di innesco di colate detritiche che si propagano lungo l'asta principale fin quasi alla sezione di chiusura del bacino.

2.2 FRANA RIO MIOZZA

La frana trova sede lungo il corso del Rio Miozza che scende dai rilievi del Comune di Ovaro (UD), paese a circa 20 km a Nord-Ovest di Tolmezzo (UD)

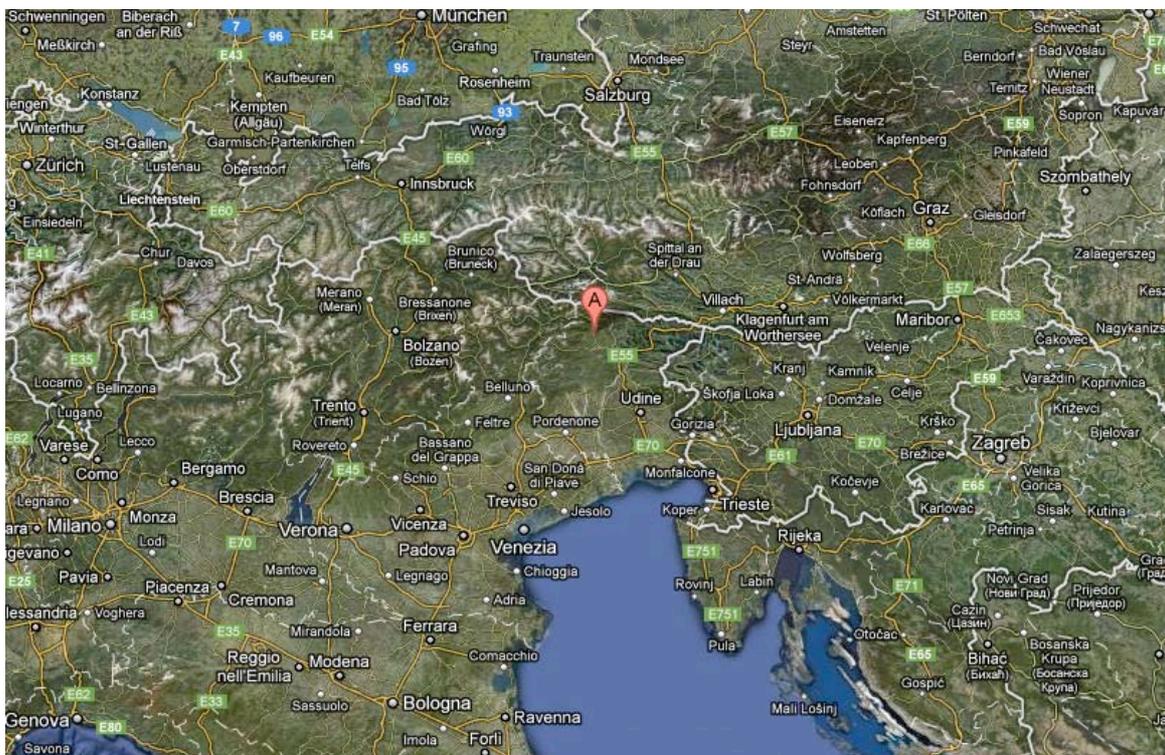


Figura 2.3.1: Localizzazione frana Rio Miozza

Si tratta di un corpo di frana di notevoli dimensioni, staccatosi nella parte alta del versante Sud-Ovest del bacino intorno ai mesi marzo/aprile 2005, che ha mobilizzato una considerevole quantità di materiale lapideo ad evidente matrice limo-argillosa e, per effetto dell'acqua derivante dallo scioglimento stagionale delle nevi, ha sommerso, con il suo procedere verso valle, l'alveo del torrente per diverse centinaia di metri.



Figura 2.3.2: Localizzazione frana Rio Miozza

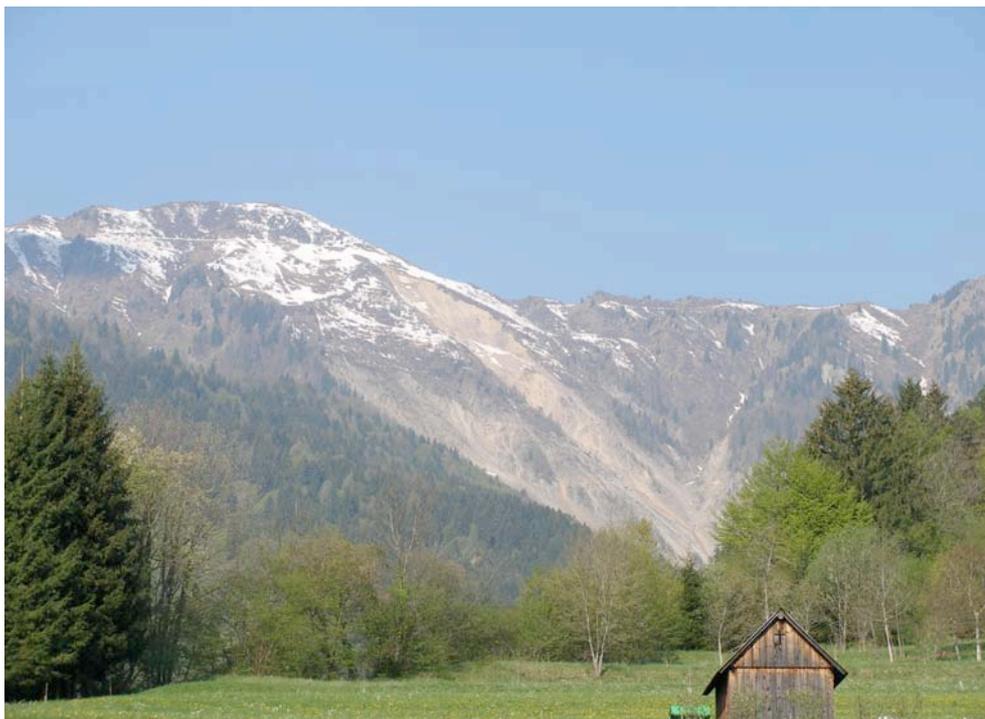


Figura 2.4: Frana Rio Miozza - Vista da valle



Figura 2.5: Frana Rio Miozza - Vista da monte



Figura 2.6: Frana Rio Miozza - Vista da monte



Figura 2.7: Frana Rio Miozza - Vista da Est

2.3 PROBLEMATICHE RISCONTRATE E DEVIAZIONE TEMPORALE DEL PROGRAMMA CONCORDATO CON IL SUPERVISORE DELLA TESI: FLOW CHART

Durante il mio primo anno di dottorato ho potuto approfondire la conoscenza della strumentazione di rilievo presente presso il laboratorio CIRGEO, utile allo svolgimento della mia tesi di dottorato. Mi sono concentrato sullo studio di tale strumentazione, testandola in molteplici situazioni e condizioni morfologiche, così da valutarne pregi e difetti. Il lavoro è stato di primaria importanza per non incorrere in alcun genere di problematica tecnica durante il corso del rilievo della frana Rio Miozza ad Ovaro. La prima fase di rilievo, avvenuta in luglio 2008, ha avuto senza dubbio esito positivo, forte del fatto che le difficoltà tecniche di metodologia di rilievo e di utilizzo della strumentazione erano state ampiamente testate nei mesi precedenti con prove sperimentali della stessa strumentazione.

Non ho riscontrato alcuna deviazione temporale del programma, peraltro ampiamente concordata e sempre con il mio supervisore prof. Vettore Antonio.

Durante il mio secondo anno di dottorato ho potuto approfondire la conoscenza delle tecniche di rilievo e del processo di post elaborazione dati, con specifico studio di software dedicati, alcuni disponibili presso il laboratorio CIRGEO, altri reperiti presso le aziende produttrici degli strumenti utilizzati. E' stata molto frequente l'attività sul campo utile allo svolgimento della mia tesi di dottorato, spaziando sia attraverso tecniche di rilievo diverse, sia attraverso siti di rilievo diversi. Il lavoro condotto unitamente ai colleghi del C.I.R.GEO è stato di primaria importanza per non incorrere in alcun genere di problematica tecnica durante il corso del rilievo della frana Rio Miozza ad Ovaro. Il rilievo, proseguito a settembre/ottobre 2009, ha avuto senza dubbio esito positivo, forte del fatto che le difficoltà tecniche di metodologia di rilievo e di utilizzo della strumentazione erano state ampiamente testate nei mesi precedenti con prove sperimentali della stessa strumentazione. Unica nota negativa è da ricondursi allo spazio temporale assai ristretto per eseguire le campagne di rilievo, vista la cospicua piovosità dei luoghi e soprattutto la posizione della stessa frana, libera da coltre nevosa per un periodo assai ristretto (luglio - settembre).

Non ho riscontrato alcuna deviazione temporale del programma, peraltro sempre ed ampiamente concordata con il mio supervisore prof. Vettore Antonio.

Durante il mio terzo anno di dottorato ho potuto approfondire la conoscenza delle tecniche del processo di post elaborazione dati, con specifico studio di software dedicati, alcuni disponibili presso il laboratorio CIRGEO, altri reperiti presso le aziende produttrici degli strumenti utilizzati, oltre che affinare le tecniche di rilievo, visto anche il quantitativo di esperienze in campagna eseguite. Il tutto finalizzato al rilievo conclusivo, eseguito ad agosto 2010, della frana del Rio Miozza, assai privo di difficoltà tecniche di metodologia di rilievo e di utilizzo della strumentazione ormai ampiamente testate durante il corso di questi tre anni di attività. Sono nuovamente a segnalare come nota negativa la finestra temporale assai ristretta per eseguire le campagne di rilievo, vista la cospicua piovosità dei luoghi e soprattutto la posizione della stessa frana, libera da coltre nevosa per un periodo assai ristretto (luglio - settembre), che mi ha visto costretto a richiedere una proroga di un anno per la consegna della tesi, in quanto solo ad Agosto 2010 è stato possibile completare il ciclo di rilievi previsto dal corso di studi del dottorato stesso.

Tale deviazione temporale del programma è comunque stata sempre e ampiamente concordata con il mio supervisore prof. Vettore Antonio.

Durante il mio quarto anno di dottorato ho potuto approfondire la conoscenza delle tecniche del processo di post elaborazione dati, con specifico studio di software dedicati, alcuni disponibili presso il laboratorio CIRGEO, altri reperiti presso le aziende produttrici degli strumenti utilizzati, oltre che affinare le tecniche di rilievo, visto anche il quantitativo di esperienze in campagna eseguite. Il tutto finalizzato al rilievo conclusivo, eseguito ad agosto 2010, della frana del Rio Miozza, assai privo di difficoltà tecniche di metodologia di rilievo e di utilizzo della strumentazione ormai ampiamente testate durante il corso di questi tre anni di attività. Sono nuovamente a segnalare come nota negativa la finestra temporale assai ristretta per eseguire le campagne di rilievo, vista la cospicua piovosità dei luoghi e soprattutto la posizione della stessa frana, libera da coltre

nevosa per un periodo assai ristretto (luglio - settembre), che mi ha visto costretto a richiedere una proroga di un anno per la consegna della tesi, in quanto solo ad Agosto 2010 è stato possibile completare il ciclo di rilievi previsto dal corso di studi del dottorato stesso.

Durante il corso dell'ultimo anno esclusivamente dedicato all'elaborazione dei modelli già elaborati della frana per la produzione di un DTM finale, è stato utile allo studio dei volumi di frana.

La deviazione temporale del programma è comunque stata sempre e ampiamente stata concordata con il mio supervisore prof. Vettore Antonio.

CAPITOLO 3.

STATO DELL'ARTE RELATIVO ALLA PROBLEMATICHE TRATTATA: USO DI TLS E LIDAR PER MONITORAGGIO AMBIENTALE, IN PARTICOLARE FRANE

Da alcuni anni la ricerca ha introdotto sul mercato un nuovo tipo di strumentazione con tecnologia scanner. La tecnica del laser scanning si basa sul metodo di misura delle distanze per mezzo di onde elettromagnetiche. Il laser scanner è in grado di acquisire le 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 (LIDAR) basato sulla scansione del territorio, sorvolato da un aereo 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;

laser scanner terrestre (TLS), 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.

Detta strumentazione rappresenta uno dei più veloci metodi di acquisizione di forme e geometrie più o meno complesse. La diffusione di questa strumentazione ha recenti origini, tuttavia, si è assistito nel corso di questo decennio, ad uno sviluppo tecnologico sia della strumentazione stessa che della produzione di software, che lascia pensare ad un futuro in cui tale applicazione troverà grande espansione ed interesse. Gli strumenti di acquisizione, infatti, diventano sempre più precisi, accurati e veloci nel corso degli anni. 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 (points cloud, nuvola di punti), generalmente rilevante rispetto ad un sistema di riferimento interno allo strumento, che rappresentano i punti oggetto colpiti dal raggio laser. Per laser si intende un dispositivo che amplifica la luce producendo fasci luminosi monocromatici e coerenti, con frequenze che vanno dall'infrarosso all'ultravioletto e, recentemente, anche nel range dei raggi X.

3.1 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DEI LASER

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 avviene attraverso la misura del tempo Δt impiegato da un impulso per andare dal distanziometro al riflettore e viceversa:

$$2D = v \cdot \Delta t, \text{ avendo indicato con } v \text{ la velocità della luce;}$$

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).

3.1.1 DISTANZIOMETRI AD IMPULSI

Tali strumenti si basano sul principio del tempo di volo (TOF) del raggio laser. Si eseguono tre misurazioni: angolo zenitale α , angolo azimutale β e distanza d .(vedi figura 3.1)

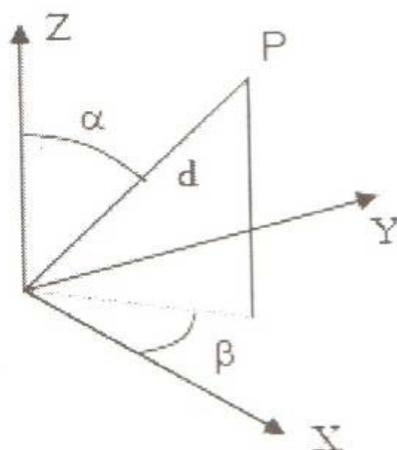


Figura 3.1 – Descrizione dei parametri misurabili con distanziometri ad impulsi.

Il risultato di queste misure è la posizione tridimensionale (x, y, z) di un gran numero di punti (nuvola di punti o points cloud) che descrive la superficie dell'oggetto osservato.

Nei distanziometri esiste un oscillatore stabile di precisione $p = 3 \cdot 10^{-8}$ s ad una frequenza $f = 14.900$ MHz che permette di operare con lunghezze d'onda $\lambda = 20$ m. Il diodo è attraversato per un tempo ristrettissimo (dell'ordine di 12 ns circa) da una forte corrente di 20÷30 A emettendo un fascio di luce laser. Dopo un intervallo di tempo Δt giunge al ricevitore il segnale di ritorno.

Denominato T il periodo della frequenza fondamentale f ($t = 1/f$), l'intervallo Δt tra la partenza del segnale e l'arrivo sarà:

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

La (1) permette di calcolare il tempo impiegato dall'impulso attraverso la somma algebrica del numero di periodi interi trascorsi (nT) dei tempi residui, compresi tra lo Start (t_a) e lo Stop (t_b), e la prima oscillazione di riferimento immediatamente successiva. 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, del condensatore.

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 retro-riflettore, che ne riverbera una parte verso l'apparecchio ricevente, il quale interpreta la differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta. Lo sfasamento dipende dalla distanza esistente tra il distanziometro e il prisma. 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).

3.2 LASER SCANNER AEREO

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) 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 aereomobile 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). 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.

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.

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).

Mediante la metodologia laser è possibile ottenere modelli digitali del terreno con elevata precisione (DTM), mediante l'applicazione dei suddetti filtri che sono basati su interpolazioni iterative robuste, morfologie matematiche, ecc.

3.3 LASER SCANNER TERRESTRE

I laser scanner terrestri possono essere distinti in due categorie:

- scanner distanziometrici;
- scanner a triangolazione.

Nei primi, la misura della distanza può avvenire tramite due metodologie TOF (Time Of Flight) oppure tramite la misura della differenza di fase.

3.3.1 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. Il rilievo si realizza definendo l'area di interesse che si vuole acquisire e la densità di punti desiderata.

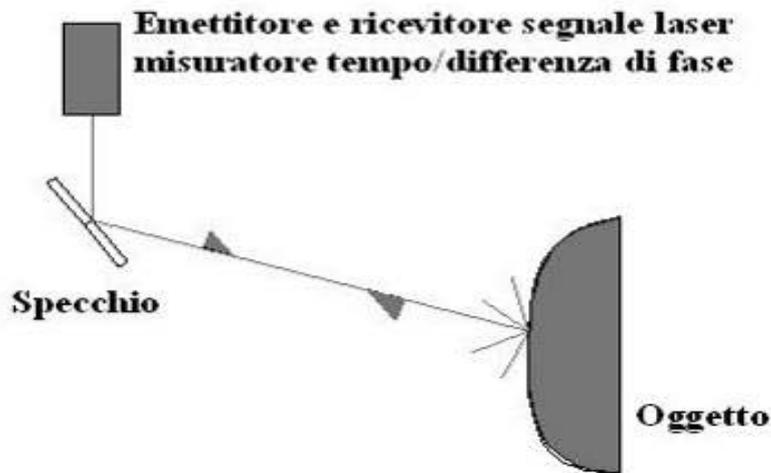


Figura 3.2 – Schema di funzionamento di un laser scanner distanziometrico.

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.

3.3.2 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.

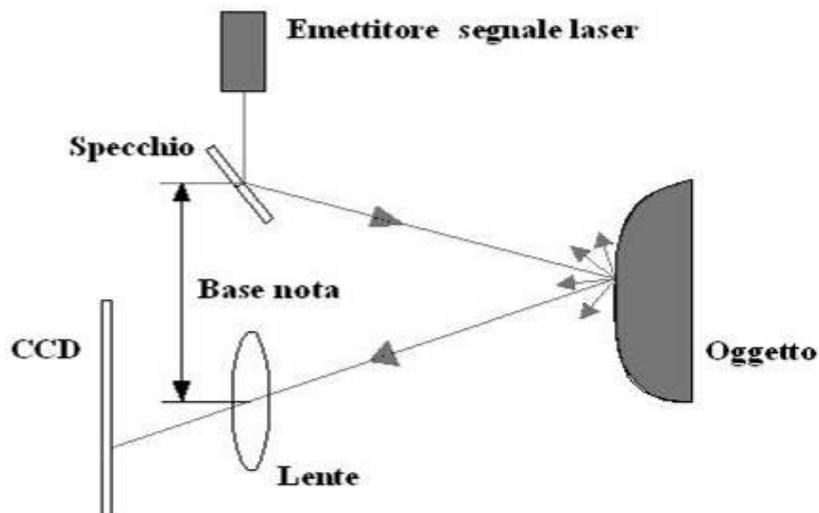


Figura 3.3 – Schema di funzionamento di un laser scanner triangolatore.

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.

3.3.3 SISTEMI A TEMPO DI VOLO

I sistemi a tempo di volo sono apparati che si basano sulla misura di distanza (ranging instruments), in analogia con i distanziometri elettronici. Il raggio laser, mediante opportuni sistemi ottico/meccanici in rotazione, viene inviato verso l'oggetto variando per passi discreti gli angoli azimutale e zenitale. La distanza tra il centro strumentale ed il primo punto che il raggio incontra e da cui viene riflesso viene determinata dalla misura del tempo di volo (TOF, time of flight) che intercorre tra l'emissione e la ricezione, oppure, in alternativa per differenza di fase; la distanza, insieme alla conoscenza dei due angoli di emissione del raggio, consente di determinare per coordinate polari la posizione del punto in questione. All'utente tali coordinate vengono in prima istanza fornite in un sistema cartesiano (X,Y,Z) che ha origine nel centro strumentale.

La distanza r tra sorgente del raggio e oggetto da rilevare si ottiene dal tempo di propagazione t_r dell'onda luminosa riflessa; se c indica la velocità della luce ($c = 2.998 \times 10^8$ m/s), t_r si ricava da:

$$t_r = \frac{2r}{c}$$

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.

3.3.4 SISTEMI A TRIANGOLAZIONE

Il funzionamento dei dispositivi a triangolazione è concettualmente semplice: un raggio laser, 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 sensore di immagine a stato solido CCD, posto ad una distanza prefissata e calibrata (base) rispetto alla sorgente di emissione del raggio stesso. Il principio di misura delle coordinate di un punto è dunque del tutto analogo alla triangolazione in topografia. Questi strumenti operano su distanze ridotte ma offrono una precisione maggiore, anche sub-millimetrica, rispetto a quelli illustrati in precedenza (per il principio su cui si basano, la precisione è ovviamente molto sensibile alla distanza tra scanner ed oggetto, e la base è necessariamente piccola).

3.4 SISTEMI OTTICI ATTIVI: CARATTERISTICHE FONDAMENTALI

La letteratura sul problema della precisione e dell'accuratezza degli scanner risulta ancora molto carente; inoltre, insieme alle caratteristiche strumentali intrinseche, vi sono altri fattori che intervengono durante un rilievo e determinano una certa percentuale di punti in posizione errata: un caso comune è costituito dalla presenza sull'oggetto di spigoli e lati i quali vengono colpiti solo in parte dall'impronta del raggio, pur essendo essa molto ristretta, e questa, andando a colpire altri oggetti nel suo percorso, genera segnali spuri di ritorno, che vengono a "sporcare" il primo fornendo posizioni 3D errate. Un problema è dunque quello del controllo di qualità di questi dati, e non è facile affidarlo completamente a tecniche automatiche di filtraggio, quali possono essere quelle sviluppate per i sistemi laser aviotrasportati, che sfruttano risposte multiple.

Congiuntamente alla misurazione della distanza, questi strumenti sono in genere in grado di misurare anche la riflettanza di ciascun punto-oggetto alla frequenza propria del raggio (in genere nella zona spettrale dell'infrarosso) e, in taluni casi, di acquisire l'immagine RGB co-registrata con il dato laser. Il

prodotto della scansione è costituito da una o più “nuvole” di punti ad altissima densità – migliaia o centinaia di migliaia di punti - che descrivono con estremo dettaglio la superficie dell’oggetto e di quanto compare nel campo di vista strumentale (molti strumenti sono in grado di scansionare a 360° in orizzontale e con campi di apertura in verticale molto ampi). Tali dati tuttavia sono indifferenziati qualitativamente e quindi costituiscono un prodotto lontano dalle classiche rappresentazioni grafiche derivate da rilievi diretti o fotogrammetrici, in cui il disegno è frutto del “filtro” e della sintesi soggettiva di un operatore che seleziona e codifica gli elementi di interesse.

Va sottolineata l’importanza per il campo applicativo delle tecniche di texture mapping fotografiche: la riproduzione della/delle fotografie sulla superficie del modello 3D metrico costituisce un notevole aiuto nello studio e interpretazione di un oggetto, anche perché non bisogna dimenticare che in numerose situazioni l’immagine fotografica contiene informazioni estremamente preziose sullo stato di conservazione di un bene, sui colori, tracce di umidità, eventuali piccole lesioni, ecc. Di altrettanto interesse è l’uso della ortofoto di precisione (“true orthophoto”), generata a partire da più immagini diverse, con la possibilità anche di eliminare nel prodotto finale eventuali elementi di disturbo.

Rispetto all’operatività dei laser a scansione nei comuni contesti di rilevamento dei beni culturali, si possono fare alcune osservazioni:

- la scelta dello scanner deve essere orientata alle dimensioni dell’oggetto, alla distanza di acquisizione ed alla precisione richiesta;

- la tecnica fornisce grande velocità di acquisizione con elevato automatismo, non è virtualmente richiesto un rilievo topografico congiunto se è sufficiente operare in un sistema locale;

- la descrizione completa di un oggetto richiede in genere più acquisizioni da stazioni diverse, a coprire eventuali lacune causate dalla forma (soprattutto per oggetti a tutto tondo, es. sculture) e dunque il rilievo va accuratamente pianificato; è molto comune l’uso di target ad alta riflettanza, piani o sferici, per consentire la giunzione tra scansioni diverse;

- i problemi logistici (trasporto e peso degli strumenti, alimentazione elettrica, necessità di operare nelle ore notturne o con bassa luce per strumenti

a triangolazione o a misura di fase) possono essere molto vincolanti in talune circostanze

3.4.1 SISTEMI OTTICI ATTIVI: SOFTWARE

L'elemento chiave per un uso proficuo del laser a scansione è sicuramente il software. Su questo pesano tuttavia numerose incognite; lo stato dell'arte offre alcuni prodotti di buon livello, ma altri presentano ancora forti lacune. Spesso si tratta infatti di programmi sviluppati per campi applicativi quali il settore industriale ed il reverse engineering, con procedure che tendono a modellare su superfici artificiali regolari e a riconoscere nell'oggetto primitive solide elementari (cilindri, parallelepipedi, ecc.).

Le funzionalità di base contenute in un pacchetto software per l'elaborazione di dati laser terrestri sono riassunte brevemente nella figura 3.4.

I pacchetti principali in uso sono una decina o poco più, anche di produzione italiana; si tratta di prodotti autonomi oppure che si appoggiano a pacchetti esterni, ad esempio CAD. Questi prodotti coprono una gamma di problematiche che non è normalmente affrontata da un programma CAD o da un software per la gestione di dati tridimensionali in forma di DTM; si pensi per esempio alla generazione della mesh per un oggetto a tutto tondo, come una scultura; in questo caso non si può gestire il grigliato come successione di altezze associate a punti disposti in modo regolare in planimetria (cosiddetto approccio 2.5D, usato in genere nella modellazione del terreno) ma la gestione dovrebbe essere totalmente tridimensionale, con la complessità che ciò comporta dal punto di vista computazionale. La fase di generazione della mesh è una delle più delicate, ed i risultati forniti da programmi diversi su uno stesso oggetto possono differenziarsi significativamente. Inoltre, la sequenza di certe operazioni (es. filtraggio) non è standard, e si possono usare per esse differenti strategie in fasi diverse del processo di elaborazione.

Procedura	Note
visualizzazione dei dati primari nella forma di mappe di distanza e intensità (eventualmente colore RGB), oppure di nuvole di punti	in genere presente nei programmi forniti a corredo dello strumento
pulizia del dato primario (eliminazione di punti errati)	in modalità interattiva o con metodi semi-automatici
soltimento e filtraggio dei dati	riduzione del numero dei punti e del rumore dovuto alla precisione strumentale; in genere preferibile effettuare lo soltimento dopo la fusione di scansioni
fusione di scansioni diverse	combinazione di "nuvole" diverse in un unico insieme, sulla base di target comuni e/o elementi naturali riconosciuti in modo automatico o interattivo. Eventuale successiva pulizia dei dati.
assegnazione ad un sistema di riferimento oggetto	sulla base di punti naturali o artificiali di coordinate note (da rilievo topografico o fotogrammetrico): necessaria se si desidera la fusione della superficie da l.s. con immagini fotogrammetriche (ortofoto)
soltimento ed omogeneizzazione nella distribuzione dei punti	la nuvola finale viene ridotta al fine di avere una densità dei punti uniforme o legata al tipo di superficie
<i>fitting</i> mediante primitive geometriche	superfici semplici (parallelepipedi, cilindri, ecc.) vengono adattate alla nuvola dei punti: sviluppato soprattutto per applicazioni industriali, non idoneo per molti oggetti di interesse archeologico
generazione di <i>mesh</i> poligonali	operazione svolta in 2.5D o in 3D, richiede un intervento di parametrizzazione iniziale e in genere un <i>editing</i> finale da parte dell'operatore
modellazione secondo rappresentazioni matematiche (<i>splines</i> , NURBS)	più consona alle geometrie del disegno industriale
realizzazione di prodotti 3D fotorealistici mediante mappatura del modello con <i>texture</i> ed immagini	la superficie del modello a <i>mesh</i> può essere rappresentata con: - applicazione di tessiture artificiali o prelevate da immagini reali - riproiezione di immagini fotografiche (noti, o ricavati contestualmente, i loro parametri di orientamento interno ed esterno) - colorazione mediante il dato di riflettanza o colore acquisito dallo scanner stesso
esecuzione interattiva di misure	in particolare distanze tra punti naturali
generazione di profili e sezioni, ortofoto, modelli VRML, ecc. ed esportazione verso l'utilizzo esterno (CAD, browser, ecc.)	sezioni generate in automatico dalla nuvola dei punti o dal modello tridimensionale; particolarmente interessante la generazione di ortofoto di precisione

Figura 3.4 – Schematizzazione delle principali procedure presenti in un programma per l'elaborazione di dati laser a scansione terrestre

3.5 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, lo strumento, nella fase di acquisizione, è in grado di unire singole scansioni fatte da una medesima posizione strumentale in un'unica scansione, in quanto riferite allo stesso sistema di riferimento. Viceversa, se le scansioni sono eseguite da posizioni strumentali diverse, queste vengono riferite a sistemi di riferimento distinti, con la necessità che ciascuna di esse presenti delle zone di sovrapposizione con le altre affinché possano venire unite a formare il modello.

In base a tali premesse pertanto possiamo distinguere le fasi più salienti di questa metodologia di rilievo in:

- ◆ pianificazione della campagna: 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: le informazioni di profondità ottenute dal sensore per ogni "vista" dell'oggetto sono in genere trasformate in forma di mesh triangolari e, se possibile, arricchite da informazione di colore;
- ◆ allineamento o registrazione: 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: dopo averle allineate in uno spazio cartesiano comune, 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.

3.5.1 ELABORAZIONE DEI DATI

Gli strumenti laser sono collegati ad un PC portatile che contiene il software di gestione e memorizza i dati da elaborare. In base ai parametri

precedentemente definiti, relativi all'area di scansione e alla risoluzione (spaziatura fra gli impulsi emessi), lo strumento acquisisce una fitta nuvola di punti spaziali, con densità massima della griglia di scansione funzione del tipo di strumento adottato.

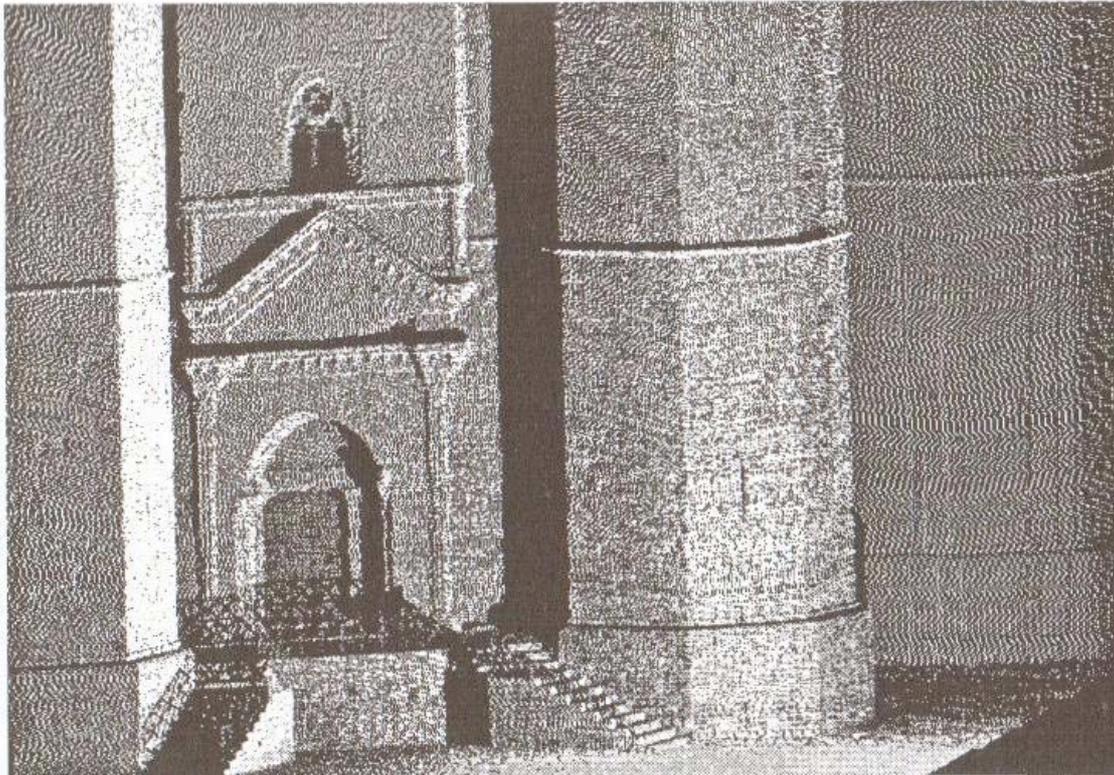


Figura 3.5 – Esempio di una singola scansione di Castel del Monte.

Le funzioni assolate dai software di gestione sono: controllo e gestione dell'acquisizione dei dati, pre-trattamento dei dati (rimozione del rumore e registrazione delle scansioni), trattamento dei dati filtrati (modellazione solida), integrazione con altre informazioni (mappatura di immagini digitali). Con le informazioni metriche sono acquisite anche informazioni relative alla riflettività delle superfici. Alcuni strumenti, inoltre, riproducono anche un'immagine con l'informazione cromatica relativa a tutti i punti della scansione utilizzabile per produrre foto texture da applicare direttamente al 3D e/o necessaria per l'inquadramento preventivo dell'area da scansionare.

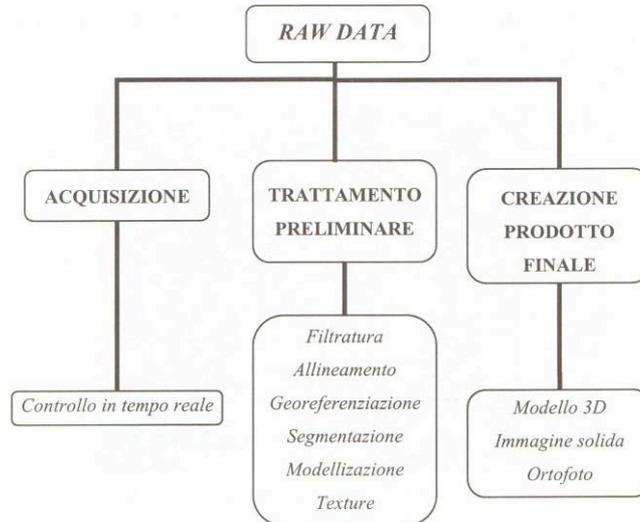


Figura 3.6 – Gestione dei dati laser.

Il risultato di una sequenza di scansioni, effettuate da differenti punti, è una serie di nuvole di punti collegabili tra loro mediante targets riflettenti di riferimento o mediante punti riconoscibili sulla successione delle scansioni.

Questa fase, che rientra nel pre-trattamento dei dati, costituisce la procedura di registrazione che consiste nella rototraslazione di tutte le scansioni in un unico sistema di riferimento. Affinché la registrazione sia attuabile è necessario avere un sufficiente ricoprimento tra le successive scansioni (superiore al 30%), in modo da ottenere il riconoscimento di punti omologhi sulla zona in sovrapposizione; nel modello ottenuto ogni punto è georeferenziato.

La modellizzazione delle superfici avviene attraverso le procedure di meshing, che consiste nella realizzazione di triangoli tra i punti della nuvola e la possibile generazione di una superficie complessa. La fase di generazione delle mesh è una delle più delicate. È possibile “spalmare” le immagini provenienti da una qualsiasi camera sul modello triangolato mediante il riconoscimento di punti omologhi tra la nuvola e l’immagine. Le eventuali immagini di riflettenza generate da laser scanner possono essere utilizzate per identificare i suddetti punti.

3.5.2 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 di registrazione di tutte le nuvole di punti in un unico sistema di riferimento. Questa operazione risulta una delle più importanti e delicate da cui dipenderà la correttezza del modello finale.

Per realizzare l'unione delle nuvole di punti possono essere utilizzate diverse metodologie, a seguito dell'operatività avuta in fase di acquisizione.

È possibile eseguire l'allineamento attraverso:

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

Nel primo caso si osserva che sul mercato esistono strumenti che sono in grado di orientare il sistema di riferimento interno (così come per le stazioni totali), operando collegamenti tra le stazioni di acquisizione ed un sistema di riferimento esterno. 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. Individuando un numero sufficiente di punti comuni a due scansioni adiacenti, è possibile determinare i parametri della rototraslazione spaziale che trasforma i punti della seconda scansione nel sistema di riferimento della prima. L'individuazione di tali punti può avvenire in modo automatico, utilizzando punti targets, o in alternativa, individuando punti 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.

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.

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 Closet Point – Besl, 1992), 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. 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.

La fase di assemblaggio di più scansioni contemporaneamente con la distribuzione dell'errore su tutte le stesse, considera una minimizzazione complessiva della deviazione principale attraverso l'algoritmo ICP che riduce ai minimi quadrati le distanze tra i punti.

La registrazione di un modello non è altro, quindi, che una rototraslazione spaziale, senza variazione di scala, rispetto al sistema di riferimento della scansione adiacente, problema che si risolve attraverso la determinazione di sei parametri indipendenti tra loro: tre traslazioni spaziali e tre rotazioni attorno agli assi principali. 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.

3.6 ESEMPI DI APPLICAZIONI DELLA TECNICA LASER A SCANSIONE

La tecnica laser a scansione è ormai consolidata nel campo dei Beni Culturali. Il suo utilizzo vede un largo impiego sia nel rilievo di siti e resti archeologici (dalle intere aree di ritrovamento fino alla particolarizzazione di statue e resti di piccole dimensioni), sia nel rilievo di edifici storici, finalizzato all'analisi strutturale degli stessi. In molti casi la metodologia è finalizzata alla valutazione della necessità di un intervento, sia a carattere estetico che strutturale.

E' interessante l'utilizzo del laser scanner per la ricostruzione tridimensionale di interni, finalizzata a scopi web e di realtà virtuale: è, infatti, sempre maggiore la richiesta da parte di utenti web di poter esplorare dal proprio PC i luoghi di maggior interesse culturale nella loro interezza.

Da qualche anno, la tecnica laser a scansione viene utilizzata anche nel campo del monitoraggio strutturale, con applicazione di analisi agli elementi finiti (FEM) a modelli tridimensionali opportunamente trattati e semplificati, ma che hanno come origine nuvole di punti complesse ed estremamente dettagliate.

Per avere un'idea delle potenzialità di questa tecnica, sono qui di seguito elencati alcuni interventi di rilievo:

- ◆ Duomo di Ancona
- ◆ Cupola del Duomo - Firenze
- ◆ Teatro Anatomico di Padova
- ◆ Domus Aurea (Roma)
- ◆ Scavi Archeologici – Montegrotto Terme (PD)
- ◆ Teatro Olimpico di Vicenza (VI)
- ◆ Applicazioni TLS applicate al monitoraggio di versanti
- ◆ Applicazioni TLS per studi morfologici su ghiacciai

Nello specifico vengono ora trattati alcuni esempi che dimostrano la versatilità della tecnica laser a scansione.

3.6.1 TEATRO ANATOMICO DI PADOVA – DA DATI TLS ALL'ANALISI FEM

Il progetto di ricerca prevede di effettuare una serie di rilievi a cadenza

annuale del Teatro Anatomico dell'Università di Padova, utilizzando una molteplicità di tecniche di rilevamento (laser scanner terrestre, stazione totale, flessimetri, fotogrammetria e termografia). Lo scopo è quello di verificare la stabilità nel tempo di tale struttura storica caratterizzata da una geometria complessa, considerando in particolare gli effetti del decadimento organico delle parti in legno. Fino ad ora sono stati eseguiti tre rilievi consecutivi del Teatro Anatomico mediante laser scanner Leica HDS 3000 e stazione totale Leica reflectorless. Durante la prima campagna di misura il Teatro è stato rilevato completamente in modo da derivarne un modello 3D utilizzabile per condurre un'analisi strutturale agli Elementi Finiti; nei successivi rilievi, finalizzati al controllo di stabilità, è stata rilevata solamente una porzione della struttura, quella ritenuta maggiormente suscettibile di deformazioni, data l'impossibilità di posizionare la strumentazione in una zona totalmente stabile, esternamente alla struttura da rilevare. Inoltre, al fine di valutare l'entità di eventuali danni o indebolimenti subiti dalle parti in legno a causa di variazioni di temperatura, umidità o presenza di termiti, è stato inoltre pianificato di eseguire una serie di rilievi termografici su alcune porzioni della struttura.

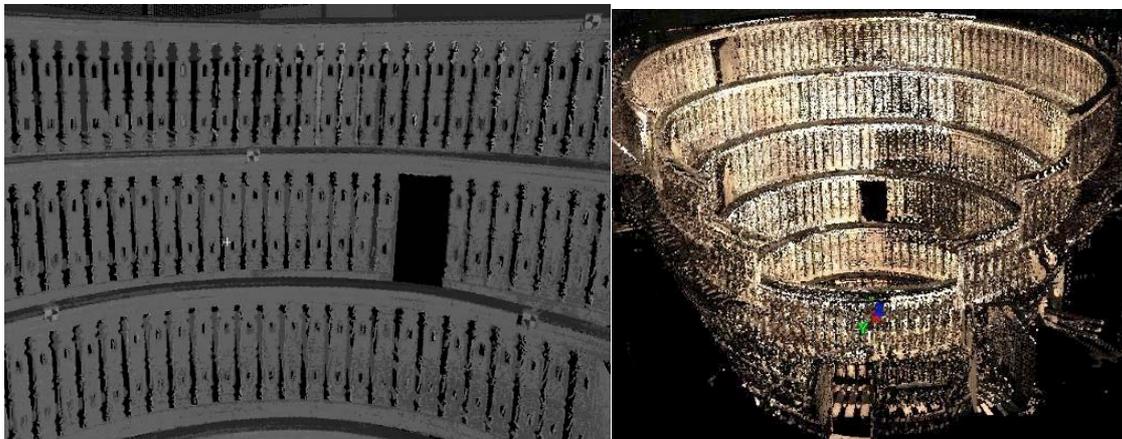


Figura 3.7 – Singola scansione del Teatro Anatomico (sx) – Modello allineato (dx)

Tutti i dati utilizzati per la modellazione 3D e per il controllo di stabilità del Teatro Anatomico sono stati acquisiti mediante laser scanner terrestre Leica HDS 3000. Nel corso dei rilievi effettuati sono state adottate differenti strategie di acquisizione. Per quanto riguarda la produzione di un modello 3D su cui basare la successiva analisi agli elementi finiti, l'intera struttura è stata rilevata adottando una risoluzione spaziale di 1 cm per gli elementi lignei, mentre target

bianchi e neri, non retroriflettenti, sono stati misurati con una risoluzione di 2 mm. L'impiego di mire artificiali si è reso necessario onde evitare possibili errori di selezione dei punti omologhi nel corso della registrazione delle scansioni, dato l'elevato grado di similarità presente tra esse. Complessivamente sono state acquisite 7 scansioni per un totale di circa 25.850.000 nell'arco di due giorni di lavoro. I successivi rilievi sono stati invece eseguiti solamente per acquisire dati utili al controllo della stabilità. A causa della complessità geometrica del Teatro Anatomico e soprattutto data l'impossibilità di posizionare la strumentazione laser all'esterno del Teatro medesimo in zona ritenuta totalmente stabile, le misure hanno riguardato solo una porzione specifica della struttura, quella ritenuta più suscettibile di subire gli effetti di eventuali deformazioni. In tale zona 10 target retroriflettenti sono stati rilevati mediante la stazione totale reflectorless: le misure ottenute sono state successivamente impiegate per valutare, tramite confronto sugli stessi punti, la capacità del laser scanner di misurare eventuali spostamenti verticali della struttura.

Le scansioni acquisite sono state registrate mediante software Cyclone adottando la classica procedura a due passi, consistente in una fase di pre-allineamento basata sulla selezione manuale dei target omologhi, seguita dalla fase di registrazione globale, basata sull'algoritmo ICP.

Successivamente alla registrazione, la nuvola di punti è stata segmentata in due blocchi principali, l'uno contenente la sola porzione di soffitto, l'altro i 6 livelli. Ciascun blocco è stato quindi sottoposto ad una procedura di decimazione utilizzando differenti valori del passo di campionamento e precisamente: 5 cm per il soffitto e 2 cm per i livelli. Tali valori sono stati individuati dopo vari tentativi finalizzati ad ottenere un modello sufficientemente semplificato tale da garantire comunque il grado di dettaglio necessario per la successiva fase di elaborazione di un modello texturizzato finalizzato a presentazioni multimediali.

La semplificazione del modello 3D originale è stata ottenuta operando in più passi. Inizialmente si è provveduto a selezionare alcuni elementi del modello triangolato ritenuti rappresentativi dell'intera struttura rilevata, ovvero: una balaustra per ciascun livello, i corri-mano e porzioni della pavimentazione

di ciascun livello. Ciascuno di tali elementi è stato poi rimodellato separatamente in AutoCAD in modo da derivarne una rappresentazione ulteriormente semplificata che è stata quindi impiegata come replica per sostituire elementi analoghi all'interno del modello 3D. Sostanzialmente al profilo di ciascun elemento campione, estratto manualmente dal modello laser è stata applicata un'operazione di estrusione utilizzando per la profondità l'informazione desunta dal modello laser originale. Il prodotto così ottenuto è stato successivamente importato in ambiente 3D Studio Max dove si è proceduto alla sua texturizzazione utilizzando sia librerie di materiali già disponibili in tale software sia informazioni più specifiche sulle caratteristiche degli elementi lignei, ottenendo come risultato finale quanto mostrato in figura.

Al fine di verificare se la strumentazione laser scanner terrestre potesse essere utilizzata per eseguire controlli di stabilità di strutture antiche di interesse storico, culturale e architettonico, si è proceduto ad eseguire ulteriori rilievi misti, TLS stazione totale su una porzione dei sei livelli. Per determinare eventuali scostamenti in direzione verticale, una serie di target retroriflettenti quadrati, di dimensioni 3" x 3", sono stati misurati con entrambi gli strumenti. In particolare 10 di essi sono stati posizionati lungo i corrimano dei vari livelli mentre altri 6 sono stati affissi alle pareti del Teatro, considerate stabili, ed utilizzati come riferimenti per orientare i rilievi successivi. Per valutare la presenza di eventuali scostamenti lungo la direzione verticale, sono stati confrontati tra loro i valori della coordinata Z del centro di ciascun target, ottenuti in corrispondenza di rilievi consecutivi.

Essendo interessati agli scostamenti tra le posizioni rilevate per ognuno dei 10 target nel corso di successive scansioni, le misure acquisite dal laser scanner e dalla stazione totale non sono state riportate in un comune sistema di riferimento, bensì le differenze tra le coordinate Z delle misure laser sono state confrontate con le corrispondenti ottenute dalla stazione totale, assumendo come valore di riferimento (scostamento nullo) le posizioni dei target dopo il secondo rilievo. Tale confronto è stato reso possibile considerando che entrambi gli strumenti sono stati adeguatamente livellati ad ogni sessione di scansione, rendendo così paralleli tra loro i rispettivi assi Z.

In merito alla generazione di un modello 3D del Teatro Anatomico atto ad

essere impiegato come base dati su cui condurre un'analisi FEM (Finite Element Analysis), è stato necessario operare un'ulteriore semplificazione, decimando il modello 3D ottenuto precedentemente con un passo di campionamento pari a 5 cm. Il modello è stato quindi triangolato mediante software Geomagic derivando una mesh di circa 117000 triangoli, la quale è stata successivamente importata in formato dxf in Strauss, software FEM. In tale ambiente alle superfici dei vari triangoli (plates) componenti la mesh sono state assegnate le medesime proprietà fisico-meccaniche, ovvero la mesh è stata assimilata ad un'unica struttura in noce, continua ed omogenea caratterizzata da uno spessore di 3 cm. La struttura è stata quindi considerata vincolata sia al pavimento sottostante al primo livello sia alle pareti circostanti, rimuovendo i gradi di libertà sia dei nodi (vertici dei triangoli) posti nella parte inferiore del modello sia dei nodi appartenenti al pavimento del livello più elevato, come mostrato in figura 11 (punti in colore viola). Infine si è supposto che a ciascun plate fosse applicata una forza di 400 kg/m², agente lungo l'asse Z, in modo da simulare l'effetto di una massa compatta di persone distribuita lungo i sei livelli. Si può dimostrare che gli effetti di un tale carico si sviluppano soprattutto sul pavimento di ogni livello, mentre gli effetti su altre parti della struttura sono trascurabili.

In accordo con quanto stabilito dalla vigente legislazione italiana in materia di analisi strutturale, sono state condotte due diverse tipologie di analisi:

Statica, dalla quale sono stati derivati grafici delle tensioni e dei momenti applicati ai vari plates, considerando l'azione dei seguenti fattori:

- 1- peso proprio della struttura;
- 2 - peso della massa compatta di persone;

Dinamica, nella quale è stata considerata l'azione combinata dei seguenti tre fattori:

- 1 - peso proprio della struttura;
- 2 - peso della massa compatta di persone;
- 3 - evento sismico attraverso la simulazione di un sisma applicato alla struttura in oggetto .

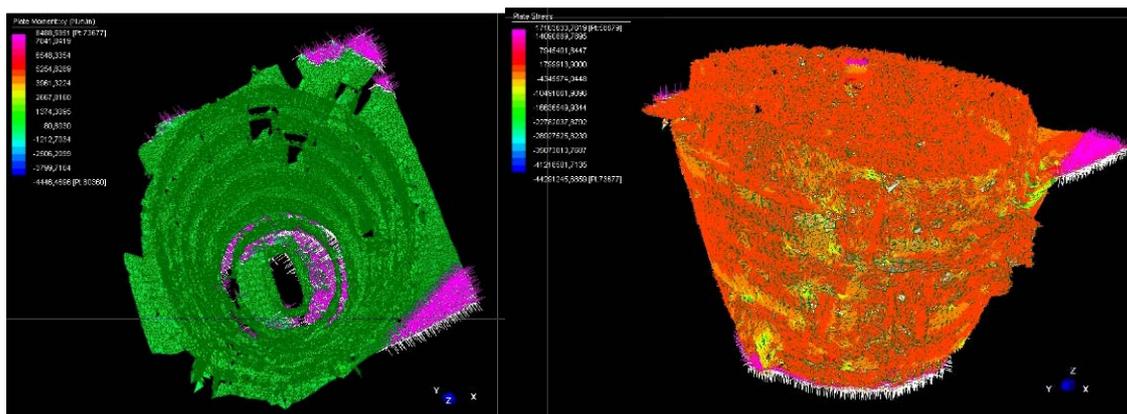


Figura 3.8 – Risultati dell’Analisi Statica Lineare

A tal fine, benchè la città di Padova appartenga alla zona di sismicità di livello 4 (bassa probabilità di terremoti) si è supposto che il modello del Teatro Anatomico fosse sottoposto agli effetti di un sisma tipico di zone a livello 3.

I risultati ottenuti dall’analisi statica sono mostrati rispettivamente nella figura 3.8, mentre per quanto riguarda l’analisi dinamica i risultati vengono forniti da Strauss sottoforma di video e pertanto non sono riportati in questa nota.

3.6.2 IL MONASTERO DI SAN GIORGIO FUORI LE MURA A FERRARA

Il soggetto del nostro rilievo mediante Laser Scanner Cyrax2500 è stato il chiostro della chiesa di S.Giorgio a Ferrara. Questo tipo di scanner 3D è particolarmente indicato per il rilievo di edifici di grandi dimensioni. Esso permette di rilevare a distanza la morfologia di una struttura architettonica, con un pennello di luce che scivola sulle superfici da studiare. La tecnologia per il rilievo dell’oggetto è detta “a tempo di volo”, cioè il tempo che il raggio laser inviato contro l’oggetto impiega a ritornare allo strumento. Si riesce quindi a ricavare una nuvola di punti che descrive l’oggetto nello spazio.

La prima fase del lavoro si svolge sul campo e consiste nella realizzazione delle scansioni, previa collocazione dei targets e realizzazione di un eidotipo (schizzo delle sezioni) di riferimento. Per ogni ambiente occorre fare più prese per integrare i dati mancanti dovuti alle zone d’ombra generate dai corpi interposti tra lo scanner e l’oggetto d’interesse. La maglia dei punti che permettono la scansione è stata settata in modo tale da avere raffittimenti in

corrispondenza di elementi architettonici particolarmente complessi o significativi. Lo strumento ha una precisione di 5-6 mm ad una distanza di 50 m e con campi di ripresa sino ad una distanza di 100-150 m.

Il sistema è composto da due parti: lo scanner vero e proprio e il software che funziona come interfaccia-utente per lo scanner. Per attivare lo scanner, l'operatore lo orienta verso l'oggetto e immediatamente una videocamera posta dentro lo strumento acquisisce un'immagine video che permette all'operatore di visualizzare ciò che sta per rilevare. Quindi tramite cursore del portatile, viene tracciato un rettangolo entro l'immagine video dell'area che si intende rilevare, si indica il passo di maglia e si lancia la scansione. Il sistema colleziona misure di geometrie 3D alla velocità di 800 punti al secondo.

Sono state prese scansioni multiple da posizioni ed orientamenti differenti dello scanner e registrate usando il software Cyclone che permette un'immediata misurazione dei punti rilevati ed una facile conversione di modelli 3D in disegni 2D. Mediante questo strumento è possibile, risalire alle caratteristiche geometriche dell'oggetto che si intende rilevare, e anche ottenere un'ulteriore importante informazione, la riflettanza della superficie colpita. Ogni raggio infatti restituisce quattro informazioni: le tre coordinate del punto rilevato e il valore della riflettanza, che cambia a seconda della natura del materiale, della sua lavorazione superficiale e dello stato di degrado.



Figura 3.9 – Mesh 3D

Per la registrazione delle viste è necessaria la presenza in ognuna di almeno tre punti omologhi (X,Y,Z), scelti in modo tale da formare triangoli il più possibile equilateri, a cui poi è applicata la matrice di rototraslazione dei due riferimenti nello spazio. Tali punti vengono materializzati con targets, mire realizzate con pellicole molto riflettenti, posizionati sulla superficie dell'oggetto del rilievo e numerati, che permettono il montaggio automatico delle varie scansioni. I targets utilizzati sono quadrati delle dimensioni di 7,5x7,5 cm posizionati su tutte le superfici da rilevare e che, grazie alla loro elevata riflettanza, vengono riconosciuti dallo scanner.

Un eidotipo eseguito manualmente aiuta a riconoscere in ogni scansione i targets evidenziati, per poter poi eseguire la numerazione dei targets stessi, in modo da renderli univoci. Il software consente poi di esaminare le varie parti del modello virtuale 3D realizzato, modificando il punto di vista dell'osservatore mediante l'applicazione di rototraslazioni successive. Un'ulteriore possibilità fornita dal programma è quella di visualizzare le scansioni secondo differenti modalità di rendering: i punti acquisiti possono infatti essere "colorati" in base all'intensità del segnale laser riflesso all'oggetto oppure possono essere convertiti in superfici di maglie di poligoni triangolari regolari (wireframe).

Il modello globale ottenuto fornisce informazioni dettagliate per quanto concerne la morfologia e la struttura del manufatto, dando indicazioni sulle aree di riflettanza omogenee da tener presenti come base, unitamente al rilievo visivo e fotografico, per rilevare le varie patologie di degrado presenti. Per rendere più riconoscibili le varie scansioni si possono assegnare dei colori a ognuna così è possibile capire la sequenza delle fasi di montaggio che hanno portato alla costruzione del modello finale.

Un'ulteriore fase dell'elaborazione del modello 3D consiste nell'applicazione alle immagini prodotte dallo scanner delle mesh, per poter poi determinare le sezioni sul modello. Ciò è possibile per tutti e tre i piani dello spazio. Il modello è quindi visibile tramite le linee di sezione. Si può scegliere allora la sezione più significativa, estrapolarla e quindi visualizzarla, potendola quindi ripulire e semplificarla tramite esportazione dei file in formato .dgn e .dwg, elaborabili attraverso programmi appositi di disegno CAD.

3.6.3 TECNICA LASER SCANNER PER IL RILIEVO DI INCIDENTI STRADALI

E' in fase di sperimentazione l'impiego del Laser Scanner come strumento topografico per il rilievo di incidenti stradali, nonché il suo utilizzo per operazioni peritali su auto incidentate. A tal fine sono stati già effettuati una serie di test, rilevando la simulazione di un sinistro mediante laser scanner LEICA HDS 3000 ed eseguendo le elaborazioni dei dati (allineamento delle scansioni, misure e confronti) con il software di modellazione 3D PolyWorks Modeler/Inspector.

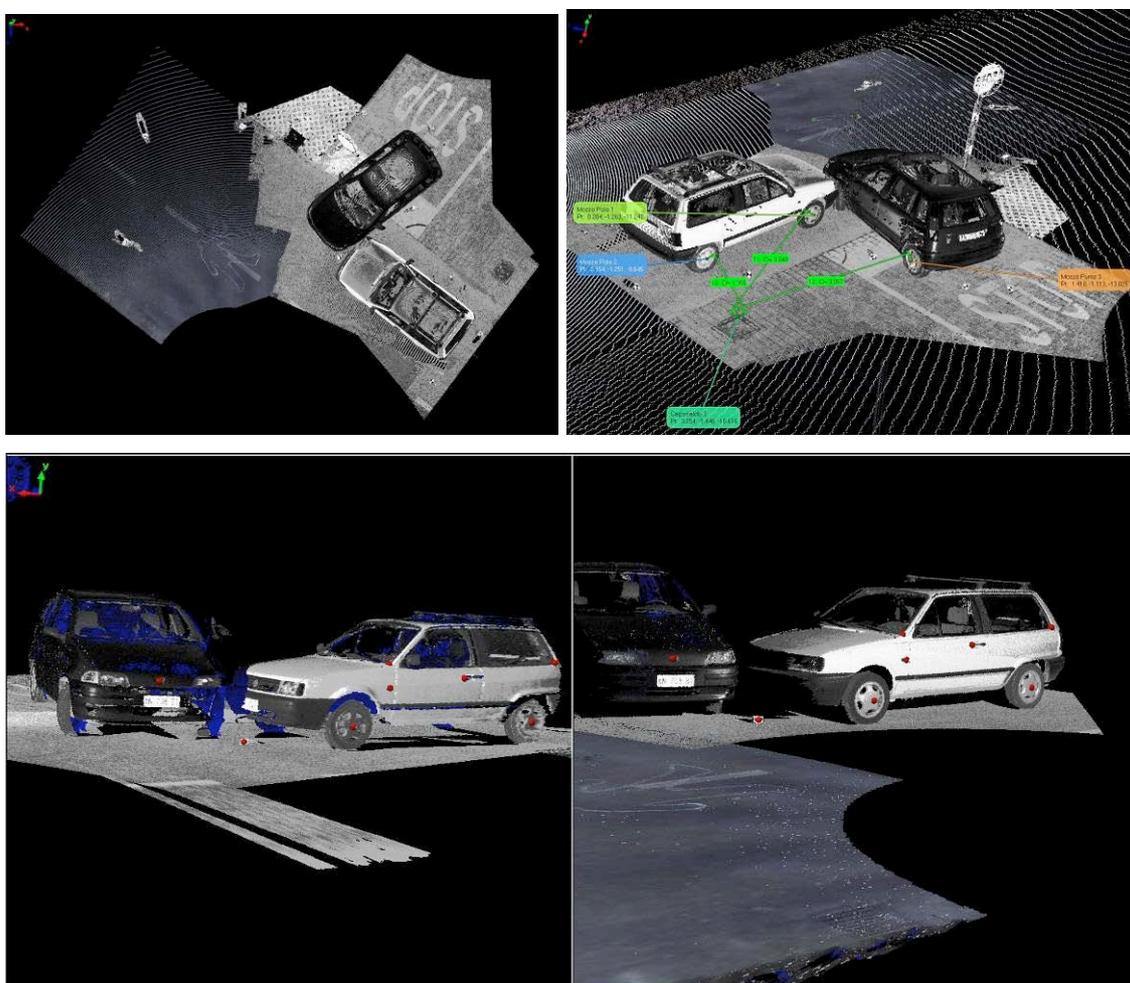


Figura 3.10.1 – Ricostruzione della scena di un incidente stradale

A partire dalla fase di rilievo vero e proprio, ricostruendo la scena di un incidente stradale partendo da singole scansioni, si viene a creare un modello 3D della scena in grado di fornire un rilievo puntuale e duraturo nel tempo,

certamente più completo e dettagliato rispetto a quello tradizionalmente effettuato dagli Organi di Polizia competente. Di norma questi ultimi utilizzano il metodo di rilievo tradizionale basato sul semplice utilizzo di cordella metrica e camera digitale.

Per quanto riguarda invece la fase di indagine peritale, sovrapponendo due modelli 3D di una stessa auto, incidentata e non incidentata, si cerca di valutare se sia possibile risalire con precisione alla velocità del mezzo prima dell'urto, nonché alla dinamica dell'urto stesso.

Dalle prove effettuate si riscontrano tuttavia tempi di presa delle scansioni ancora troppo lunghi, dovendo tenere occupata la sede stradale sino al termine delle operazioni di rilievo. Inoltre si è riscontrato che alcuni particolari tipi di vernice utilizzati dai costruttori di auto non vengono rilevate dal laser, creando dei vuoti, anche di notevole dimensione, all'interno della nuvola di punti.

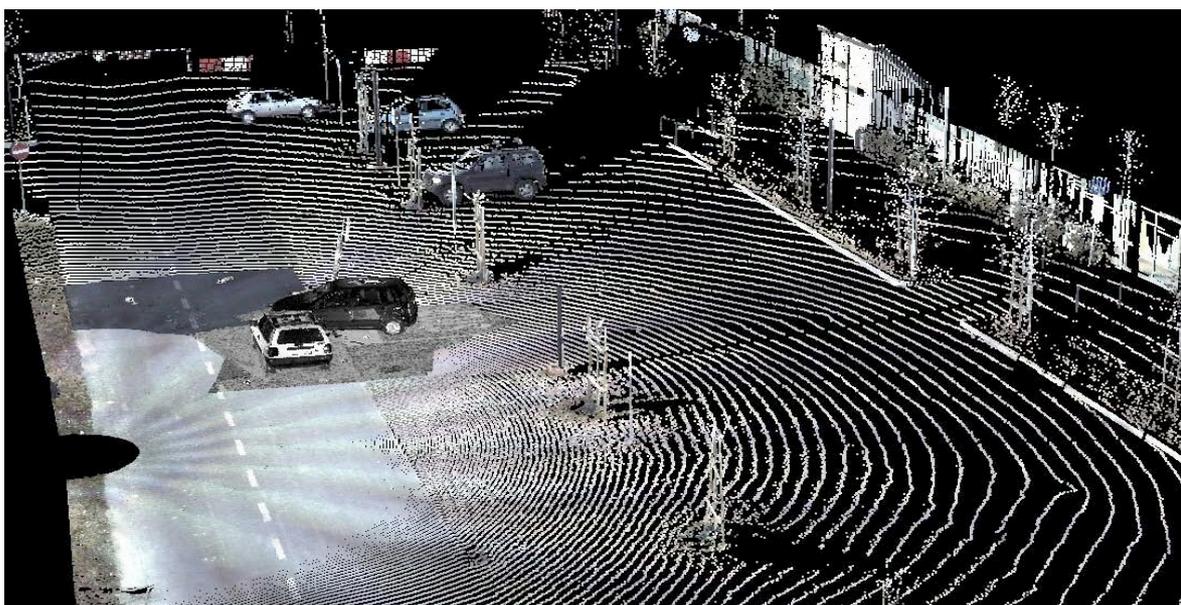


Figura 3.10.2 – Ricostruzione della scena di un incidente stradale

3.6.4 IL TEATRO OLIMPICO DI VICENZA

Un altro esempio di applicazione ai Beni Culturali della modellazione 3D basata su dati acquisiti utilizzando le metodologie di misura proprie della fotogrammetria e della tecnologia laser a scansione terrestre è il Teatro Olimpico di Vicenza. Progettato dall'architetto rinascimentale Andrea Palladio è

ritenuto il primo esempio di teatro stabile coperto dell'epoca moderna.

Le tecniche utilizzate per eseguire il rilievo sono due: la Fotogrammetria Digitale e Laser Scanner; due tecniche che non sono in competizione tra loro, ma devono integrarsi, o meglio, complementarsi una con l'altra; in questo modo sarà possibile ottenere un prodotto 3D migliore dal punto di vista qualitativo e metrico in rapporto ai tempi di realizzazione. Inoltre l'applicazione di queste due tecniche di rilevamento si presta perfettamente alla particolare geometria superficiale del Teatro Olimpico: a volte semplice e a volte complessa (parti delle scene Scamozziane dietro il palco).

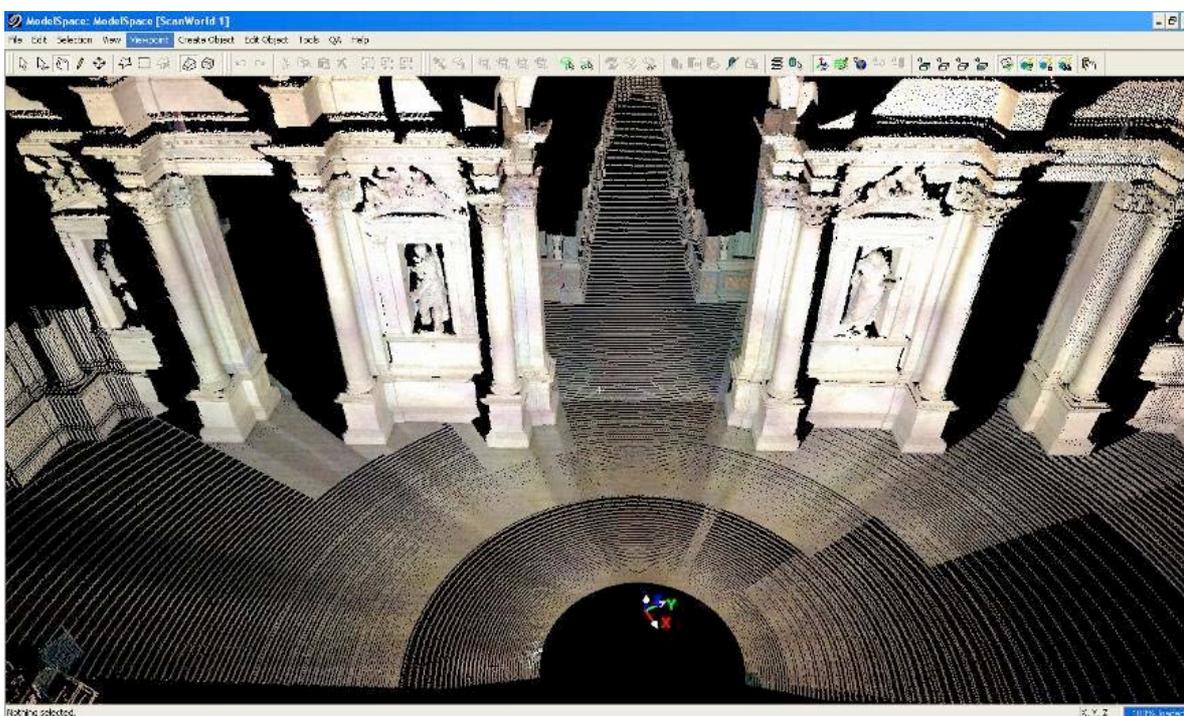


Figura 3.11 – Scansione del Teatro Olimpico

Circa 150 immagini delle 200 scattate sono state utilizzate per la realizzazione del modello 3D fotogrammetrico mediante software Photomodeler. Il progetto è stato diviso in 3 parti (P1 per le scene Scamozziane, P2 per le gradinate, P3 per statue e particolari in marmo) a causa dell'alta risoluzione delle immagini e della complessità del progetto. Successivamente le tre parti sono state fuse insieme selezionando punti omologhi distribuiti nei tre modelli parziali.

Il fattore di scala e l'orientamento assoluto del modello globale sono stati

ottenuti attraverso tre control points misurati con una stazione totale Leica.

In merito alla tecnica Laser a Scansione si è ottenuto un modello 3D utilizzando come strumento il laser Leica HDS 3000 e come software per gestire le scansioni e allineamenti Cyclone 5.

Una delle prime operazioni da eseguire, dopo aver collegato il laser al pc (tramite cavo di rete) è quella di determinare alcuni parametri fondamentali per le scansioni tramite lo Scan Control del software Cyclone. La risoluzione media di scansione (point spacing) è stata impostata su 7mm per le gradinate, 5 mm per il palco e 3 mm per le scene scamozziane, per un totale di 36 scansioni (Scanworld) distinte. Il risultato è una nuvola di punti globale di circa 69.873.302 punti.

La realizzazione del modello 3D del Teatro Olimpico è stato eseguito in Cyclone REGISTER, modulo utile all'allineamento delle scansioni, di generazione e di editing della mesh. La scelta di questo programma è la capacità di gestire nuvole di punti elevate e la capacità di comunicare con semplicità con altri software tipo AutoCAD. Inoltre tale modulo opera sulle nuvole di punti originali eseguendo la registrazione tra scansioni adiacenti sfruttando l'algoritmo ICP.

Per l'allineamento delle varie scansioni si sono utilizzati dei punti omologhi (targets) individuati e selezionati manualmente (matching point). Il tempo impiegato è stato di 4 giorni allineando le varie scansioni a coppie.

Per un buon risultato di allineamento si processa il tutto comparandolo con l'errore residuo di registrazione (RMS Root Mean Square) relativo a ciascuna coppia di scansioni. I risultati ottenuti per il Teatro Olimpico sono stati ottimi (7mm) tenendo conto che la precisione della misura del laser è di 6mm @ 50m.

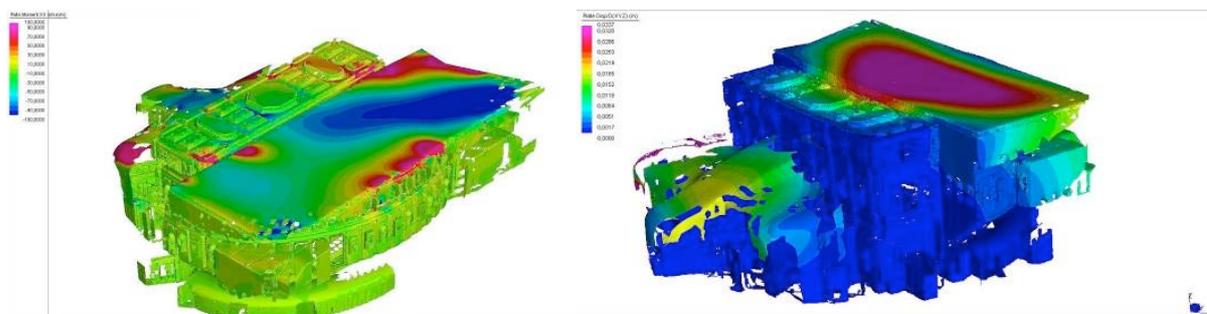


Figure 3.11-3.12: Teatro Olimpico: Analisi Statica e Dinamica

Dopo aver registrato le scansioni il modello 3D ottenuto è stato integrato con quello realizzato mediante fotogrammetria digitale, modellando il prodotto finale con un programma di 3D editing, Rhino, con la finalità di ottenere un video per web. In seconda fase il modello 3D laser è stato triangolato mediante software Geomagic ai fini dell'Analisi FEM (Finite Element Analysis), il cui processamento è stato effettuato con Struass 7. A ciascun triangolo sono state applicate opportune proprietà fisico-meccaniche per ricreare uno stato analogo all'esistente: spessore 30 cm, materiale mattone pieno, per le parti in pietra; spessore 5 cm, materiale legno, per le scene scamozziate; spessore 3 cm, materiale marmo, per statue e parapetti. Sono state effettuate due Analisi (in accordo con le leggi italiane vigenti): Dinamica e Statica simulando la forza di un terremoto in zona sismica 3, pur essendo classificata zona sismica 4 la zona di appartenenza del Teatro.

3.6.5 APPLICAZIONI FINALIZZATE ALL'ANALISI FEM: PASSERELLA RARI NANTES PADOVA

Inaugurata nel Giugno 2009, questa struttura ricade in un'area a sud-ovest della città di Padova, in corrispondenza dello snodo viario del quartiere Bassanello, cerniera urbana situata all'ingresso alla città. Cercando di ottenere una continuità dei percorsi ciclopedonali, l'amministrazione comunale ha deciso a suo tempo di esguire un intervento di collegamento ciclopedonale attraverso il fiume Bacchiglione in uno dei luoghi strategicamente più opportuni allo sviluppo delle relazioni con i principali servizi dell'area, non ultimo l'intero complesso sportivo "Rari Nantes". Il progetto della passerella trae ispirazione dall'analisi e sintesi formale di uno degli "abitanti" più numerosi di quest'ambito fluviale, la gallinella d'acqua (*Gallinula chloropus*).

Realizzata secondo una struttura tubolare in acciaio, la passerella si caratterizza infatti dal punto di vista geometrico per la presenza di un arco asimmetrico inclinato di 22° rispetto alla verticale e coronato superiormente da una fascia a forma di becco d'uccello che funge da elemento di contro-bilanciamento (Fig. 1 e 2). L'impalcato presenta una larghezza complessiva variabile da 2,5 a 4 metri, oltre allo spazio destinato ai parapetti, e si sviluppa

secondo un asse pressoché perpendicolare alla giacitura del fiume con una luce netta di 75 metri. Il piano di calpestio, in legno è formato da un'orditura di travi principali e da un doppio tavolato dello spessore di cinque centimetri. Dal punto di vista statico il sistema portante è costituito da quattro meccanismi resistenti che si aiutano e stabilizzano vicendevolmente. Il primo meccanismo è caratterizzato da un arco a due cerniere costituito da profili tubolari di diametro 914 mm per la catena e 406 mm per l'arco con la funzione di sostenere verticalmente la passerella. Il secondo è formato da una reticolare di piano a livello impalcato, con la funzione di bloccare gli spostamenti orizzontali della catena dell'arco, mentre il terzo è costituito da una trave tipo Vierendel, avente come correnti l'arco stesso e un profilo scatolare di sezione triangolare disposto a una distanza variabile da 0 all'appoggio fino a circa 3 metri in chiave dell'arco, atta a contrastare gli spostamenti orizzontali e a stabilizzare l'arco stesso. Il quarto sistema serve infine ad incastrare le mensole che portano l'impalcato alla catena dell'arco. Al fine di ripartire uniformemente eventuali carichi concentrati, e quindi di limitare al massimo le deformazioni, si è prevista una trave reticolare tipo Vierendel che unisce le teste delle mensole dell'impalcato ai montanti del parapetto esterno. Le fondazioni sono infine costituite da elementi poggianti su micropali.

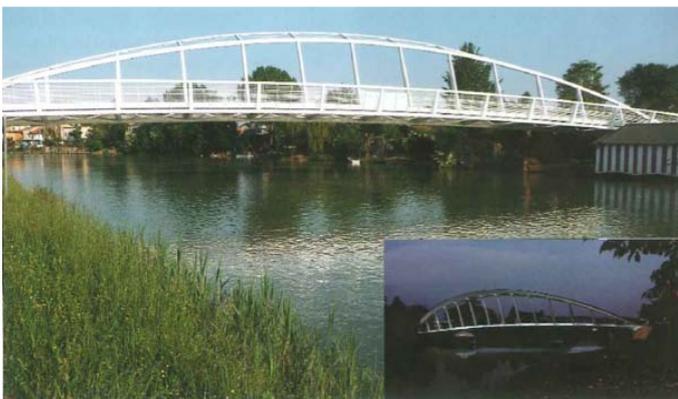


Figura 3.13: La passerella ciclopedonale "Rari Nantes".



Figura 3.14: Vista laterale della struttura.

In seguito sono stati richiesti dei rilievi ad alta definizione per il controllo di stabilità della passerella ciclopedonale recentemente installata. Procedendo con lo studio e monitoraggio del comportamento di strutture complesse

sottoposte a fenomeni deformativi subiti dalle varie parti della struttura in funzione delle prove di carico eseguite secondo le norme vigenti.

Questo è uno dei principali fattori che ha favorito l'impiego della tecnologia laser a scansione.

L'obiettivo è quello di verificare la corrispondenza tra le deformazioni subite dalla struttura e i risultati ottenuti sulla base delle misure di livellazione, TLS, GPS e accelerometriche allo scopo di verificare la corrispondenza tra le deformazioni così calcolate e quelle teoriche stimate in sede di progettazione.

Per questo le tradizionali misure di livellazione sono state, integrate da misure GPS, accelerometriche e laser scanner terrestre (TLS), che in tempi relativamente brevi, misurano milioni di punti, al fine di acquisire una più ampia tipologia di dati per eseguire la verifica di collaudo dell'opera.

Si ottengono modelli 3D completi e molto dettagliati di oggetti reali, tanto da attirare l'attenzione dei professionisti; topografi, ingegneri, architetti e archeologi a considerare il laser a scansione come uno strumento di rilevamento fondamentale per la modellazione 3D di oggetti e strutture particolarmente complesse.

I corrispondenti modelli 3D sono stati utilizzati per differenti finalità, quali ad esempio: conservazione in appositi archivi informatici, interventi di restauro, studio dei materiali componenti, studio della funzione storica dell'oggetto o struttura rilevata, mostre in musei virtuali, studio di fenomeni deformativi.

I rilievi della Passerella "Rari Nantes" sono stati eseguiti con il laser scanner Leica HDS 3000 e ricevitori GPS a doppia frequenza. I dati ottenuti dal TLS sono stati utilizzati sia per la modellazione 3D sia per il controllo di stabilità della passerella.

Nella prima fase è stato eseguito il rilievo completo della passerella in modo da derivarne un modello 3D utilizzabile per condurre un'analisi strutturale agli Elementi Finiti. A tal fine l'intera struttura è stata rilevata adottando una risoluzione spaziale di 2 cm per gli elementi in acciaio, mentre target bianchi e neri, non retroriflettenti, sono stati misurati con una risoluzione di 2 mm. L'impiego di mire artificiali si è reso necessario onde evitare possibili errori di selezione dei punti omologhi nel corso della registrazione delle scansioni, dato l'elevata complessità degli elementi costituenti la passerella. In due giorni, sono

state acquisite 5 scansioni per un totale di circa 14.350.000 punti. La validazione del modello ad elementi finiti è avvenuta anche mediante rilievo GPS integrato con misure accelerometriche al fine di ottenere risultati di posizionamento più precisi e possibili mediante l'impiego di un filtro adattivo per soli 4 punti dell'impalcato. La difficoltà nella prima fase del progetto è stata il rallentamento di tempo per spostare il laser tra le varie stazioni di presa; la presenza di traffico e del cantiere, ancora in attività, e dai vari spostamenti tra una sponda e l'altra del fiume. Nei successivi rilievi, finalizzati al controllo di stabilità e condotti durante le fasi di collaudo della struttura, è stata rilevata solamente una porzione della struttura, quella ritenuta maggiormente sollecitata e oggetto di probabili deformazioni. In questa zona sono stati misurati 10 target retroriflettenti mediante stazione totale Leica TM30: le misure ottenute sono state successivamente impiegate per valutare, tramite confronto sugli stessi punti, la capacità del laser scanner di misurare eventuali spostamenti verticali della struttura.

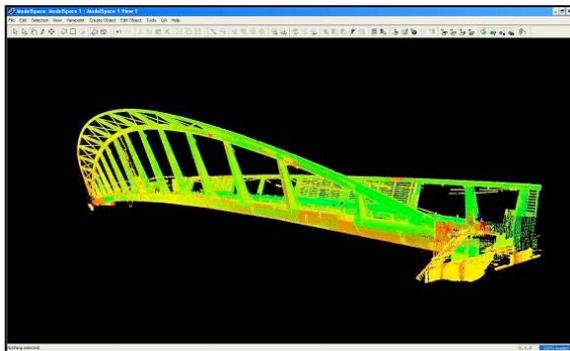


Figura 3.14: Vista laterale della passerella renderizzata a falsi colori.

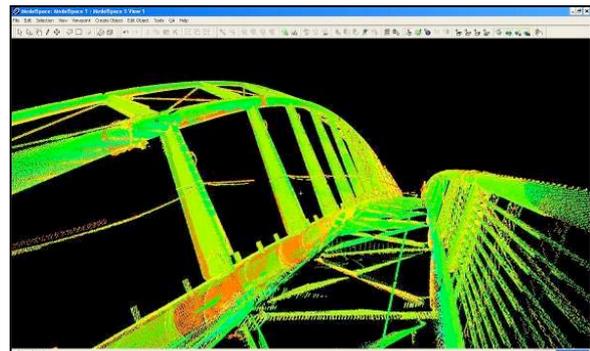


Figura 3.15: Primo piano a falsi colori della parte pedonale della passerella.

Le scansioni acquisite sono state registrate mediante software Cyclone adottando la classica procedura a due passi, consistente in una fase di pre-allineamento basata sulla selezione manuale dei target omologhi, seguita dalla fase di registrazione globale, basata sull'algoritmo ICP come descritto in (Besl, McKay, 1992; Chen, Medioni, 1992; Bergevin et al., 1996). Per quanto riguarda il pre-allineamento sono state utilizzate le scansioni laser renderizzate in scala di grigio sulla base del dato di intensità in modo da individuare più facilmente la posizione dei target all'interno delle nuvole di punti. Tale procedura ha consentito di ottenere un errore quadratico medio (RMSe) di allineamento

globale pari a circa 9 mm. Un esempio del modello 3D completamente allineato è mostrato nelle figure 3 e 4, nelle quali i punti misurati sono stati renderizzati a falsi colori sulla base del dato di intensità registrato dallo strumento.

Successivamente alla registrazione, la nuvola di punti è stata sottoposta ad una procedura di semplificazione, necessaria per poter impiegare il modello 3D in Straus, programma di analisi agli Elementi Finiti. L'intera struttura è stata quindi sotto campionata con un passo di 5 cm. Questo valore è stato scelto confrontando tra loro i risultati ottenuti da ripetute procedure di decimazione eseguite con passi differenti, valutando di volta in volta il rapporto tra livello di dettaglio e grado di semplificazione raggiunto. Il modello è stato quindi triangolato in Geomagic derivando una mesh di circa 1.197.501 triangoli, la quale è stata successivamente regionalizzata con Autocad ed infine importata in formato dxf in Straus.

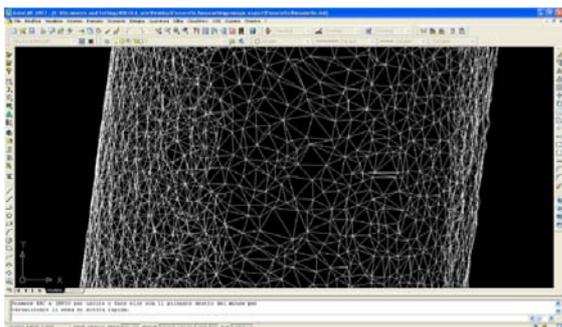


Figura 3.16: Regionalizzazione del modello 3D laser in AutoCAD.

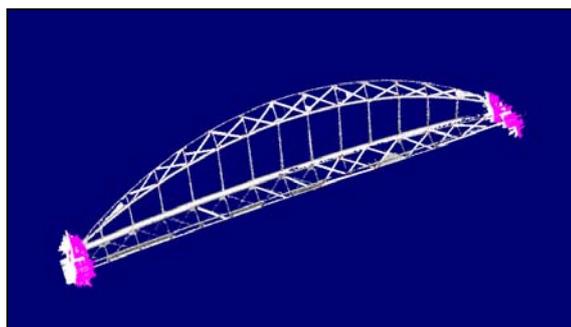


Figura 3.17: Assegnazione dei vincoli (punti in viola) alla struttura sul basamento.

Per poter applicare l'analisi FEM (Finite Element Analysis), il modello 3D laser triangolato ha subito un'ulteriore elaborazione in Straus. In particolare, alle superfici dei vari triangoli (plates) componenti la mesh sono state assegnate le medesime proprietà fisico-meccaniche, ovvero la mesh è stata assimilata ad un'unica struttura in acciaio, continua ed omogenea caratterizzata da uno spessore di 3 cm. La struttura è stata quindi considerata vincolata agli appoggi sulle sponde nord e sud del Fiume Bacchiglione, rimuovendo i gradi di libertà di tutti i nodi (vertici dei triangoli) posti alle estremità del modello (basamenti), come mostrato in figura 6 (punti in colore viola). Infine si è supposto che a ciascun plate costituente il basamento del passaggio carraio fosse applicata

una forza di 400 kg/m², agente lungo l'asse Z, in modo da simulare l'effetto di "folla compatta", applicata su tutta la parte sfavorevole della superficie di influenza.

In accordo con quanto stabilito dalla vigente legislazione italiana in materia di analisi strutturale, per un ponte di III categoria, sono state condotte due diverse tipologie di analisi:

Statica, dalla quale sono stati derivati grafici delle tensioni e dei momenti applicati ai vari plates, considerando l'azione dei seguenti fattori:

- peso proprio della struttura;
- peso della massa compatta di persone;

Dinamica, nella quale è stata considerata l'azione combinata dei seguenti tre fattori:

- peso proprio della struttura;
- peso della massa compatta di persone;
- evento sismico attraverso la simulazione di un sisma applicato alla

struttura in oggetto . A tal fine, benchè la città di Padova appartenga alla zona di sismicità di livello 4 (bassa probabilità di terremoti) si è supposto che il modello della Passerella "Rari Nantes" fosse sottoposto agli effetti di un sisma tipico di zone a livello 3.

I risultati ottenuti dall'analisi statica sono mostrati nelle figure 7 e 8, mentre per quanto riguarda l'analisi dinamica i risultati vengono esportati da Straus sottoforma di video, non riportati in questa nota.

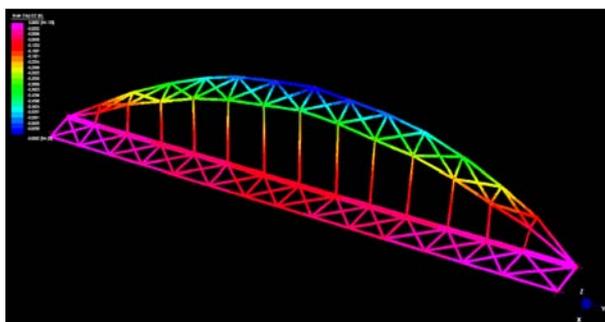


Figura 3.18: Risultato dell'analisi statica lineare. Vista degli spostamenti globali.

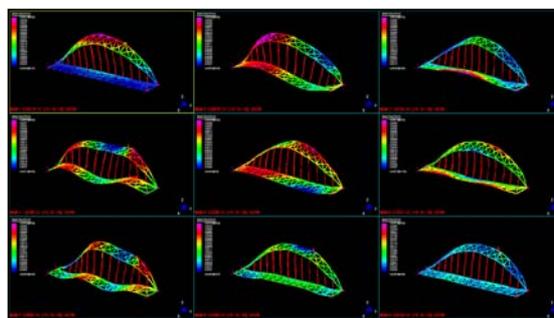


Figura 3.19: Risultato dell'analisi statica lineare. Modi propri di vibrare della struttura.

Ai fini di verificare lo stato limite delle vibrazioni nei ponti pedonali che

possono essere prodotte da varie cause quali; vento, persone singole o in gruppo che camminano, corrono, saltano sul ponte, sono stati utilizzati appropriati modelli dinamici che tengono conto sia del numero che delle posizioni delle persone simultaneamente presenti sul ponte sia di fattori estremi, quale la localizzazione del ponte stesso, e definire opportuni criteri di confronto, facendo riferimento a normative e a procedure di calcolo.

A titolo puramente informativo, si può considerare che in assenza di significative risposte da parte del ponte, una persona che cammina esercita su di esso un'azione periodica verticale con frequenza compresa tra 1 e 3 Hz e un'azione orizzontale simultanea con frequenza compresa tra 0,5 e 1,5 Hz ; un gruppo di persone in leggera corsa esercita sul ponte una frequenza verticale pari a circa 3Hz.

Durante la prova di carico la passerella è stata caricata, procedendo da sinistra verso destra, con lo schema di "folla compatta", per un carico complessivo di 90t; ad ogni step si è misurato con stazione motorizzata Leica TM30 l'abbassamento dei punti più significativi e del punto di mezzeria.

Il punto in mezzeria si è abbassato complessivamente di 14.20 cm rispetto all'abbassamento teorico (previsto nella analisi FEM di 19 cm), dando dimostrazione delle ottime capacità prestazionali del manufatto. Dopo aver scaricato completamente l'intera passerella è stata fatta un'ulteriore misurazione per valutare l'abbassamento residuo. In mezzeria tale abbassamento si è attestato sull'ordine di circa 2 cm.

Carico (t)	Spostamento (cm)
15,00	2,70
30,00	5,80
60,00	10,50
90,00	14,20

Tabella 1: Relazione tra abbassamenti in mezzeria e carico complessivo

In conclusione si può dire che, si è utilizzato un primo modello 3D per condurre un'analisi agli elementi finiti di tipo statico e dinamico, per ottenere dei risultati nell'ambito di un progetto di ricerca, finalizzato all'impiego integrato di diverse tecniche di rilevamento applicate alla Passerella ciclopedonale .

La validazione del modello FEM è avvenuta mediante GPS, accelerometri e filtro adattivo. Successivamente è stato eseguito un controllo di stabilità su una porzione della passerella, quella ritenuta maggiormente sollecitata e oggetto di probabili deformazioni.

3.6.6 TERRESTRIAL LASER SCANNER SURVEY OF TWO SMALL OF TWO SMALL GLACIAL FORMATIONS IN THE EASTERN ITALIAN ALPS

Monitoring glacial mass variations constitutes a key element for climate-related observation strategies and planning strategies for watershed management and water storages. Investigations on small ice bodies are strategic since they largely contribute to the total loss of glacier area in the European Alps, due to their large number and rapid shrinkage. In addition, they can provide important insight into processes governing glacier wastage and into snow redistribution by wind and avalanches, since they allow detailed investigations. However, direct measurements can be difficult or not feasible, due to strong avalanche activity, rock fall threat, dangerous access etc.

In the last decade, a range of new remote sensing techniques has led to a dramatic increase in terrain information. Both Terrestrial Laser Scanner (TLS) and Airborne Laser Swath Mapping technology (ALSM), using LiDAR (Light Detection And Ranging) technology, now provide high resolution topographic data with notable advantages over traditional survey techniques. The Terrestrial Laser Scanner is a potentially useful tool for small glaciers, since it provide the possibility to quickly (and safely) survey the entire ice body from few points, obtaining very high resolution data.

In this work we present a TLS survey carried out during summer 2010 in two low altitude avalanche-fed glacierets located in the Italian Julian Alps (Eastern European Alps, Figure 1). In addition we compare the TLS survey results with a traditional Total Station (TS) survey, highlighting the advantages of the new remote sensing technology.

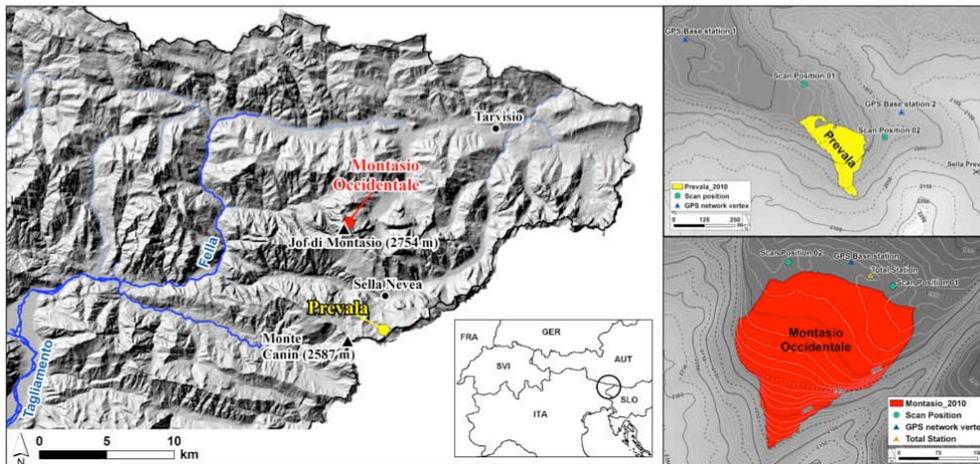


Figure 3.20 - Study sites geographical setting

METHODS:

Tools: The topographic survey of the two ice bodies was performed by the Austrian “at time-of-fly” terrestrial laser scanner system Riegl LMS-Z620. This system combines high resolution, high speed of acquisition and a large range. For every measured point the system records the range, horizontal alignment angle, vertical alignment angle and backscatter signal amplitude. The TLS system was integrated by a high-resolution Nikon D90 digital camera equipped by a 20 mm lens, that provides a RGB value to the sampled point cloud. In order to evaluate the performance of the TLS system and to compare it to a “traditional” topographic survey, we did an additional survey on the Montasio Occidentale glacieret by using a Leica TCR 702 total station.

Data collection: The Prevala glacieret was surveyed on 4 August 2010 from two scan positions. The survey was performed with a vertical and horizontal spatial resolution of 0.1 m at 300 m from the scanner. Measurements required about 30 minutes and a cloud of $9.3 \cdot 10^6$ 3D points was acquired. The survey of Montasio Occidentale glacieret was carried out on 23 September 2010. In this case the two scan positions were located over the Little Ice Age terminal moraine. Measurements were performed with a vertical and horizontal spatial resolution ranging from 0.1 to 0.3 m at 300 m from the scanner. Measurements required about 30 minutes and a cloud of $7.9 \cdot 10^6$ 3D points was acquired. In the same day a traditional topographic survey by total station was carried out from a single position located between the two TLS scan positions (Figure 1), acquir-

ing 98 points over the ice body. In both Prevala and Montasio sites, a GPS network was setup for the georeferenciation of the geodetic surveys in a global coordinate system (UTM – WGS84).

Data processing: Raw topographic data (X,Y,Z measurements) acquired by TLS were processed in two steps. At first they were georeferenced and exported by means of the Riegl proprietary software RiSCAN PRO. Then they were imported in ArcGIS 9.3 and interpolated to produce a DTM with a spatial resolution of 0.2 m. The “traditional” survey carried out by total station on Montasio Occidentale glacieret was processed in a similar way: i) georeferenciation in the UTM – WGS84 coordinate system and ii) spatial interpolation in Arcgis 9.3 obtaining a DTM with a spatial resolution of 5 m. Both DTMs were then merged with an existing 5 m DTM of the surrounding terrain.

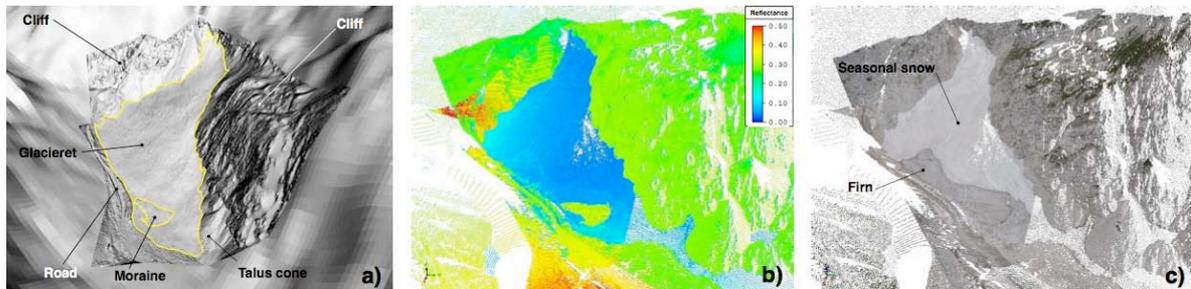


Figure 3.21 - TLS survey results on Prevala glacieret: 3D view of a) DTM hillshade, b) point cloud reflectance and c) point cloud RGB values

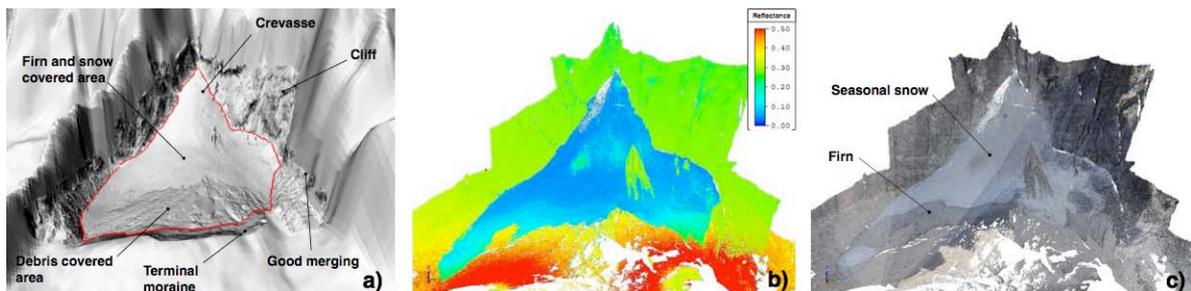


Figure 3.22 - TLS survey results on Montasio Occidentale glacieret: 3D view of a) DTM hillshade, b) point cloud reflectance and c) point cloud RGB values

RESULTS:

The TLS Survey: - The Terrestrial Laser Scanner provides very high-resolution information for the entire surveyed areas - The complete survey of both ice bod-

ies was carried out safely and very rapidly; - Additional information like reflectivity and RGB values for the 3D point clouds facilitate the analysis of results (distinction of substrata, automatic delineation of the glaciated area, identification of surface features, etc.)

Comparison with traditional surveys with Total Station: - The TLS ensures quicker and safer surveys, which results in far higher detail and spatial resolution of generated DTMs; - The entire surface of a glacier can be surveyed from few positions by TLS, acquiring a much denser sample of points; - Surface features, substrata, glacier margins and accumulation and ablation areas can be precisely mapped without direct physical access to the glacier; - The TLS permits also the survey of inaccessible or dangerous areas, even outside the glacier. This greatly improves the accuracy of the survey and the goodness of DTM merging with the surrounding topography.

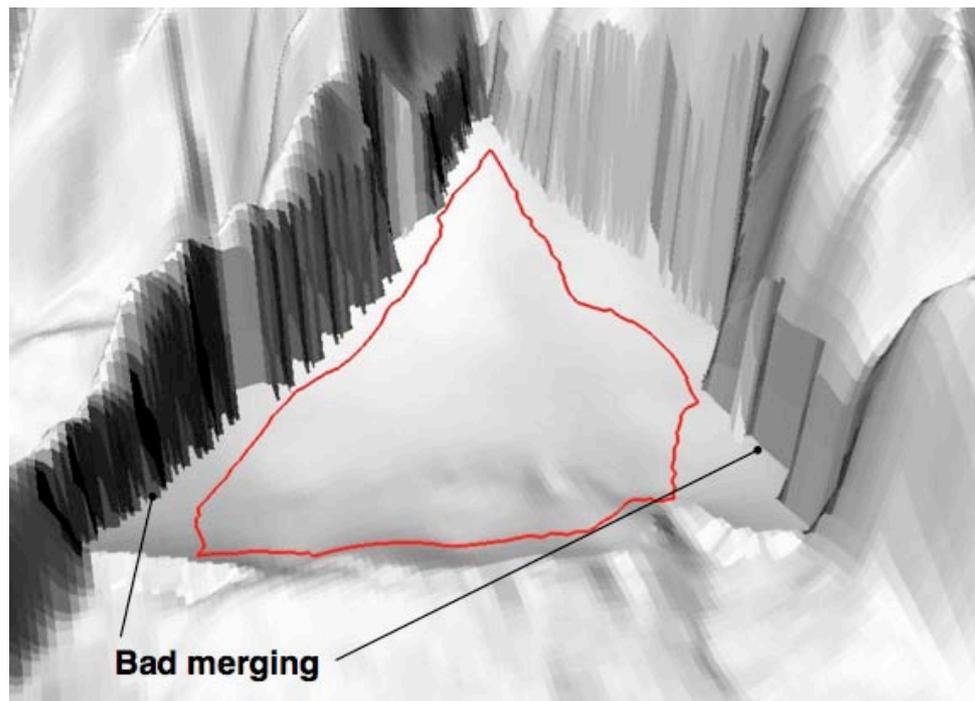


Figure 3.23 - Total Station survey results on Montasio Occidentale glacieret

Limits and drawbacks of TLS: - The useful scanner range is the main limit of the TLS. It depends on the reflectivity and orientation of the surface with respect to the laser beam - The useful scanner range of Riegl LMS-Z620 was found to

be ~ 0.5 km on old snow and firn, and ~2 km on debris/rocks. - Surface orientations tangential to the laser beam greatly reduce the useful scanner range

3.6.7 RECENTI INDAGINI GEOFISICHE, GEOMORFOLOGICHE E GEODETICHE SUL GHIACCIAIO OCCIDENTALE DEL MONTASIO (ALPI GIULIE, ITALIA)

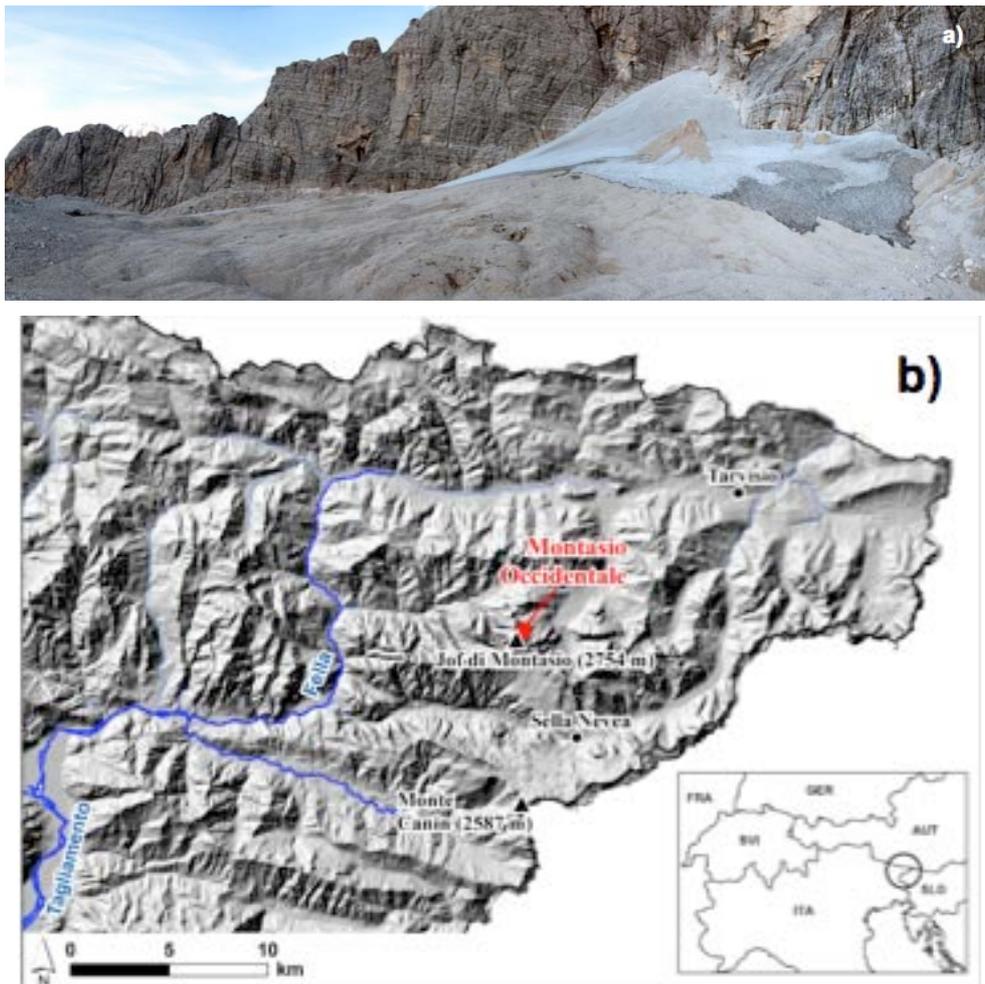


Figura 3.23 – a) Il ghiacciaio Occidentale del Montasio ripreso dalla morena frontale il 23-09-2010. b) Collocazione geografica del ghiacciaio.

La catena alpina è attualmente interessata da un processo di deglaciazione piuttosto diffusa. Tuttavia ghiacciai con caratteristiche diverse e in contesti climatici diversi stanno rispondendo in modo differenziato allo stesso forcing climatico. In questo contesto le indagini di dettaglio che è possibile svolge-

re su piccoli apparati glaciali, che sono molto diffusi e rispondono rapidamente alle variazioni climatiche, consentono di far luce sui processi in atto.

Il 23 settembre 2010 è stata svolta una campagna specifica di osservazioni sul ghiacciaio Occidentale del Montasio, un corpo glaciale di 7 ha alimentato da valanghe che occupa un circo esposto a nord ai piedi del Jof di Montasio (2746 m s.l.m.). Il ghiacciaio ha una quota media molto bassa (1940 m s.l.m.) ed è collocato in una regione geografica caratterizzata da elevate precipitazioni.

Lo scopo delle indagini è stato quello di valutare lo stato attuale del ghiacciaio (topografia superficiale, superficie, volume, condizioni di alimentazione e grado di attività) ed individuare possibili peculiarità nella risposta di questo particolare corpo glaciale alle attuali variazioni climatiche.

INDAGINI GEOFISICHE: La struttura interna del ghiacciaio e il suo spessore sono stati analizzati utilizzando un georadar dotato di antenne da 75 MHz e da 200 MHz. Il rilievo è stato eseguito lungo un transetto longitudinale e uno trasversale (Figura 3). L'antenna che ha dato i migliori risultati è stata quella da 75 MHz, che ha garantito una maggior penetrazione del segnale. Il rilievo georadar ha evidenziato lungo l'asse longitudinale A-B del ghiacciaio spessori medi pari a 16 m e valori massimi sui 22-24 m. La discontinuità ghiaccio-roccia (evidenziata in giallo) in è in genere ben visibile. Cinquanta metri a monte del punto di intersezione tra le due sezioni A-B e C-D, dove termina il firn 2009 e inizia la copertura detritica, il substrato roccioso assume una giacitura pianeggiante. All'interno del ghiacciaio si possono osservare altre aree di discontinuità. Sul punto (1) si notano strati sovrapposti di firn e neve accumulati all'apice del conoide, mentre il riflettore al punto (2), a circa 10 m di profondità, è interpretabile come un orizzonte detritico sepolto da firn e neve. Sul punto (3) lo spessore si assottiglia verso la morena frontale, tuttavia è ben osservabile una seconda superficie riflettente a circa 15-20 m di profondità. Questa superficie potrebbe corrispondere al bedrock, che in questa zona è sepolto da uno strato di materiale morenico via via crescente in direzione della morena frontale.

Sulla sezione trasversale C-D è ben evidente un riflettore (4) compreso tra la superficie e il bedrock (5), che è stato interpretato come il punto di transi-

zione tra la copertura detritica (spessa 2-3 m) e il ghiaccio sottostante. Sul punto (6) è osservabile un'incisione in roccia, per la probabile azione delle acque in scorrimento alla base del ghiacciaio, mentre in (7) si osservano riflettori interni al bedrock, interpretabili come fessurazioni, stratificazioni o cavità carsiche.

In base a questi risultati il volume del ghiacciaio è stimabile in circa $1.1 \cdot 10^6$ m³.

RILIEVO TOPOGRAFICO CON LASER SCANNER TERRESTRE (TLS): Il

ghiacciaio è stato interamente rilevato mediante un laser scanner Riegl LMS-Z620, posizionato di fronte al corpo glaciale, sull'apice della morena (Figura 4b). Il ghiacciaio è stato rilevato con una risoluzione spaziale variabile tra 0.1 e 0.3 m a 300 m dallo strumento, acquisendo una nube di $7.9 \cdot 10^6$ punti che ha consentito di ricavare un modello digitale del terreno (DTM) con una risoluzione di 0.2 m.

Contestualmente al rilievo TLS è stato eseguito un rilievo topografico con stazione totale Leica TCR702, per comparare i risultati delle due tecniche, ed è stata implementata una rete di punti GPS per georeferenziare i rilievi nel sistema UTM-WGS84.

Il TLS si è confermato uno strumento dalle ottime potenzialità, che consente di operare velocemente, in condizioni di sicurezza e con una risoluzione spaziale impensabile con le tecniche tradizionali. L'elevato dettaglio del DTM consente di mappare in modo automatico i substrati, le forme epiglaciali, i limiti del ghiacciaio e le aree di accumulo e ablazione.

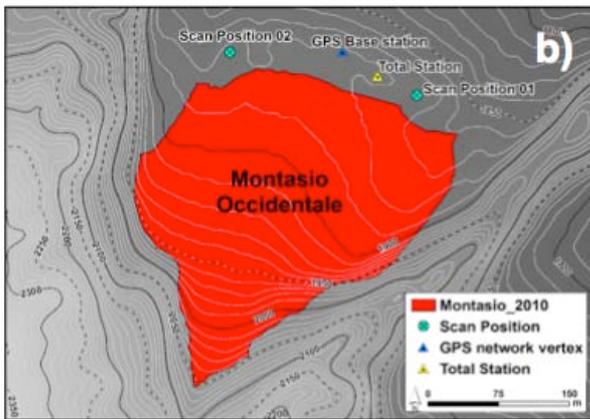
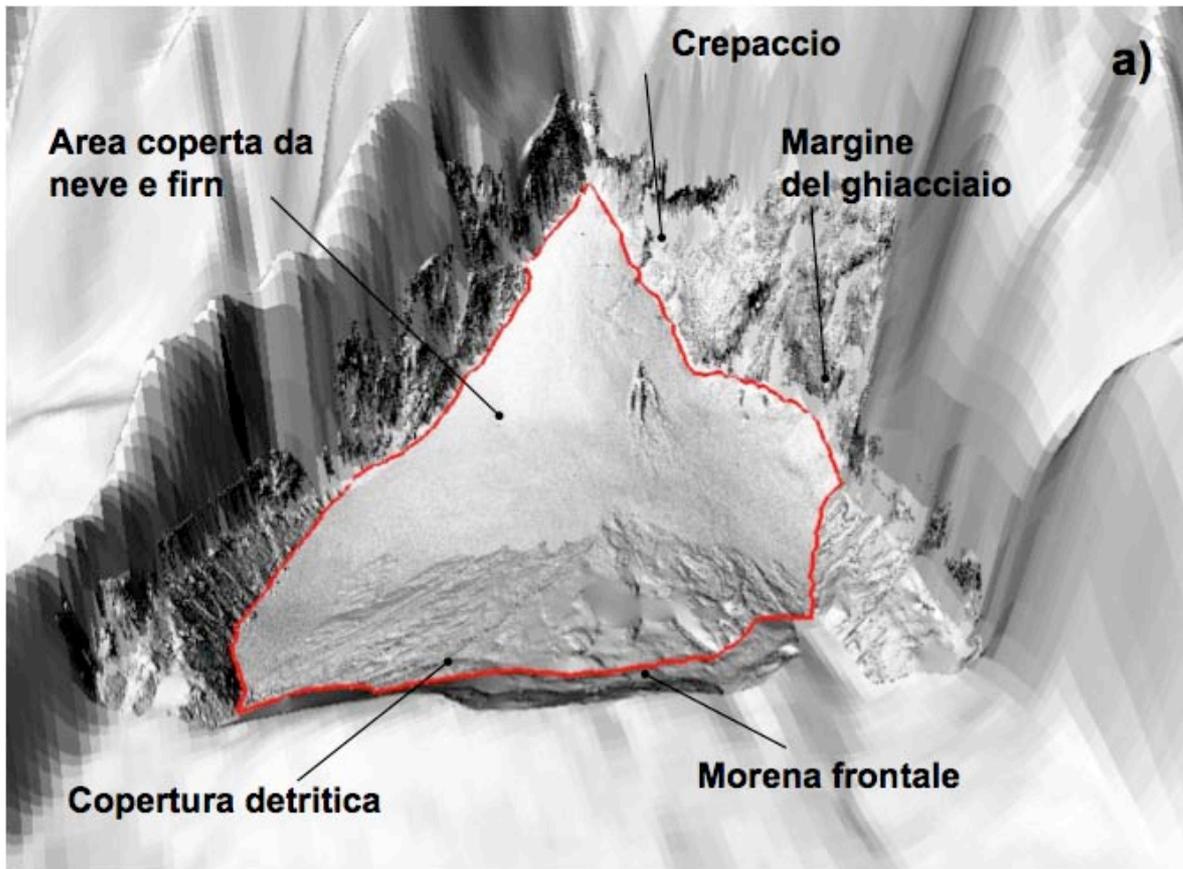


Figura 3.24 – a) Vista 3D dell’hillshade ricavato dal DTM ottenuto mediante scansione laser. b) Collocazione dei punti di stazionamento con TLS, GPS e stazione totale. c) Il laser scanner utilizzato per il rilievo della topografia superficiale del ghiacciaio.

Attualmente la superficie del ghiacciaio è di 6.9 ha, di cui 4.5 ha (65%) sono coperti da firn 2009, 3.5 ha (51%) sono coperti da neve residua del 2010 e 2.4 ha (35%) sono coperti da detrito. Questi dati evidenziano una situazione di bilancio di massa positivo negli ultimi 2 anni, in considerazione della protezione esercitata dalla spessa copertura detritica presente sull’area di ablazione.

OSSERVAZIONI GEOMORFOLOGICHE: Il ghiacciaio assume una forma a cono con apice in corrispondenza del canalone principale che si apre sulla parete settentrionale del Jof di Montasio; alla base mostra un deciso cambio di pendenza. Sul ghiacciaio affiorano sedimenti glaciali ghiaioso-sabbiosi in abbondante matrice fine, dando luogo a depositi rilevati per ablazione differenziale, a forma di cono o di cresta e alti fino a 3-4 m. La fronte glaciale è sepolta da una copertura detritica continua con sedimenti ghiaioso-sabbiosi in matrice limosa; la coltre detritica mostra una morfologia accidentata a dossi e mammelloni; si osservano forme da ghiaccio morto (kettle-holes) sia isolate che coalescenti, rilievi morenici molto arrotondati e poco espressi, solchi da ruscellamento con sezioni trasversali da 1 a 3 m e lingue da debris flow.

Il ghiacciaio è delimitato a valle da un apparato morenico costituito da una serie di cordoni di età diversa. La morena riferibile alla Piccola Età Glaciale rappresenta la dorsale principale, sulla quale è addossato internamente un secondo apparato di dimensioni più contenute connesso ad una pulsazione successiva. Esternamente alla morena principale si osservano almeno altri quattro piccoli archi ben distinti, riferibili alle fasi stadiali tardiglaciali.

Non è evidente una netta trimline; tracce della presenza di un ghiacciaio con spessori maggiori dei quelli attuali sono evidenziati da lembi di depositi glaciali, a luoghi forgiati in brevi argini morenici, addossati alla parete rocciosa, specie nel settore orientale. Il drenaggio delle acque di fusione avviene lateralmente sia in destra che in sinistra, a ridosso delle pareti rocciose, attraverso tre varchi incisi sulla morena principale (uno ad est, due ad ovest) generati dall'erosione torrentizia. Le incisioni sembrano recenti e sono forse da ricollegarsi agli eventi meteorici eccezionali della seconda metà degli anni '90. All'interno dell'alveo torrentizio affiorano rocce montonate. Davanti ai varchi si sono formati cono detritici incisi dagli scaricatori e dai fenomeni di debris flow e di scarico torrentizio .

CAPITOLO 4.
MATERIALI E METODI

4.1 LIDAR ALTM 3033 OPTECH

Nel Novembre 2003 è stato eseguito un rilievo LiDAR dell'intero bacino realizzato nell'ambito di un progetto INTERREG IIIA Italia-Slovenia, effettuato in condizioni di assenza di copertura nevosa.



Figura 4.1 – Caratteristiche e Componenti del sensore ALTM 3033 OPTECH installato su elicottero

4.1.1 SPECIFICHE TECNICHE DEL VOLO LIDAR SU ELICOTTERO

Dai dati così ottenuti è stato prodotto in ArcGIS il corrispondente DTM texturizzato con l'ortofoto derivata dalle immagini digitali. Oltre all'area di frana più estesa sono visibili anche zone minori sul lato destro.

Strumentazione impiegata	- sensore ALTM 3033 OPTECH - fotocamera digitale Rollei H20
Quota di volo media	1000 m
Densità di punti media	2 punti/m ²
Impulso registrato	First & Last



Figura 4.2 – DTM texturizzato in ArcGIS

4.1.2 ACQUISIZIONE DATI LiDAR

Nel 2004 la zona oggetto di studio è stata interessata da molteplici fenomeni di smottamento del pendio che hanno generato diverse colate detritiche lungo l'alveo principale del Rio Miozza, in conseguenza delle quali una considerevole quantità di materiale lapideo ad evidente matrice limo-argillosa ha sommerso l'alveo del torrente per diverse centinaia di metri per effetto dell'acqua derivante dallo scioglimento stagionale delle nevi. Nel Novembre 2003, in un periodo quindi antecedente alla riattivazione del corpo di frana più ampio, l'intera area era stata monitorata mediante strumentazione LiDAR nell'ambito del progetto INTERREG IIIA talia-Slovenia. Il rilievo era stato eseguito in condizioni di assenza di copertura nevosa utilizzando un sensore ALTM 3033 OPTECH ed una fotocamera digitale Rollei H20 montati su elicottero, ad una quota di volo media di 1000 m e con una densità media di 2 punti/m², registrando sia il primo che l'ultimo impulso. Dai dati così ottenuti è stato possibile produrre in ArcGIS un DTM dell'intero bacino su cui è stata successivamente drappeggiata l'ortofoto derivata dalle immagini digitali (Fig. 4.4).



Figura 4.3: In rosso la parte sommitaria del corpo di frana principale, interessata dal rilievo laser terrestre.



Figura 4.4: DTM derivato dal volo LiDAR. Oltre all'area di frana più estesa sono visibili anche zone minori sul lato destro.

4.2 LASER SCANNER RIEGL LMS-Z620

4.2.1 CARATTERISTICHE TECNICHE



Figura 4.5 – Caratteristiche e Componenti del Laser Scanner Riegl LMS-Z620

Il rilievo TLS è stato eseguito mediante il laser Riegl LMS-Z620, più specifico per analisi a lunga gittata (fino a 2.000m). Questo strumento fa parte della famiglia LMS (Laser Measurement Systems) di Riegl (30 anni di esperienza nell'ambito di laser scanner).

Il sistema laser Riegl LMS-Z620 associa le caratteristiche di un sensore ad alta precisione con la possibilità di acquisire alle massime distanze. La sua estrema portata fino ad oltre 2000 m e la sua velocità di scansione rende questo strumento unico tra tutti i laser scanner terrestri presenti sul mercato.

Il laser scanner Riegl LMS-Z620 associato al software proprietario RiscanPro per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati, e ad una fotocamera



Figura 4.6 – Riegl LMS-Z620 durante alcune fasi di un rilievo

metrica, calibrata ed installata esternamente in modalità solidale all'asse di rotazione dello strumento, permette la correlazione di immagini digitali ad alta definizione ai punti rilevati dallo scanner. Questo consente al software di generare automaticamente delle superfici (MESH, DTM, DEM) texturizzate con le immagini acquisite e di estrarre delle ortofoto metriche ad alta definizione. La sua straordinaria versatilità e robustezza (IP64) fa sì che il laser scanner Riegl LMS-Z620 non abbia limiti applicativi, diventa così lo strumento essenziale per qualunque tipologia di rilievo, dalla grande topografia, all'ingegneria civile e all'architettura. La possibilità di interfaccia con un sistema GPS e una piattaforma inerziale (IMU) rendono lo strumento unico per portata e precisione anche nelle applicazioni in movimento, Riegl offre la soluzione completa per effettuare scansioni da piattaforme mobili quali auto o imbarcazioni.

Le applicazioni principali di utilizzo di questo laser sono GEOLOGIA, TOPOGRAFIA E CAVE, MONITORAGGIO E INGEGNERIA CIVILE, ARCHEOLOGIA E BENI CULTURALI, ARCHITETTURA, RILIEVO DEL COSTRUITO, MODELLAZIONE CENTRI URBANI. Le caratteristiche del

sistema Laser Scanner LMS-Z620 sono Interfaccia con GPS, sensore inclinometrico interno per il livellamento automatico sull'asse verticale, modalità SCAN SEQUENCE, che permette di eliminare automaticamente elementi di disturbo durante la fase di scansione; alimentazione dello strumento versatile da 12 a 28V: permette di avere una scelta varia tra le fonti di alimentazione (batterie d'auto, generatori di corrente), in modo da non interrompere le normali attività di rilievo.

La fotocamera metrica, essendo esterna al laser scanner, permette un costante aggiornamento del sensore con la scelta dell'ottica migliore a seconda del tipo di lavoro. Possono essere montate fotocamere Nikon (nel nostro caso Nikon D 90) e Canon da 10 e 16 Mpixel con varie ottiche da 14mm a 200mm; inoltre vi è la possibilità di montare teleobiettivi che consentono di realizzare texture ad alta definizione per l'individuazione di morfologie interessanti quali particolari architettonici o macrofratture. La fotocamera viene posizionata sopra il laser attraverso un sistema calibrato, tale da riconoscere i parametri di georeferenziazione rispetto alla scansione (conoscenza del punto di presa di ciascun fotogramma). Altra caratteristica principale della fotocamera è quella di generare in automatico Ortofoto 2D/3D e la texturizzazione automatica di mesh con immagini ad alta risoluzione.

Laser	Classe 1 (protezione occhi) In accordo con la certificazione IEC60825-1:1993 +A1:1977 +A2:2001
Distanze misurabili	Da 2 m fino a oltre 2000 m (dipende dalla riflettività del materiale)
Ripetibilità delle misure	10 mm singola misura 5 mm con medie
Precisione	10 mm
Area di ripresa	80° verticale e 360° orizzontale (con supporto opzionale si coprono i 360° anche in verticale)
Velocità	Da 11000 p.ti/sec. ad 8000 p.ti/sec. (dipendente dalla modalità di scansione)

Lunghezza d'onda laser	(vicino infrarosso)
Divergenza del raggio laser	0,15 mrad (corrispondente ad un fascio laser di 15mm a 100m)
Minimo passo angolare verticale	0,004°
Risoluzione angolare verticale	0,002°
Minimo passo angolare orizzontale	0,004°
Risoluzione angolare orizzontale	0,002°
Dimensioni	463x210mm (lunghezza)
Peso	16 Kg (completo di tutti gli accessori)
Interfaccia	TCP/IP (Ethernet); porta parallela ECP; Wi-Fi (opzionale) Strumento controllabile tramite Pc desktop o notebook
Alimentazione	12-28 Vdc
Assorbimento	6.5 A a 12V – 3.13 A a 24V
Temperature operative	0°C + 40°C
Protezione	IP64 (protezione acqua; polvere)
Interfacciamento con GPS e Piattaforma inerziale IMU	Opzionale
Sensore inclinometrico interno	Incluso

4.3.2 SOFTWARE RISCAN PRO

RISCAN PRO è il software proprietario per i sistemi Laser Scanner Terrestri Riegli; tutti i dati acquisiti in campagna di rilievo (scansioni, dettagli di scansione, immagini digitali metriche, dati GPS, coordinate dei punti di controllo, etc) sono organizzati e salvati nelle strutture-progetto che permettono

facili esportazioni verso numerose piattaforme software di modellazione o di processamento di dati 3D.

RISCAN PRO è progettato per ottimizzare la procedura di acquisizione in campagna e fornisce gli strumenti utili per la visualizzazione ed il controllo della completezza del rilievo 3D già in campo. Oltre a tutte le funzioni di acquisizione il software fornisce svariate opportunità per la post elaborazione dei dati, quali: generazione di mesh 3D, texturizzazioni ad alta definizione, colori di volumi e superfici, estrazioni di orto immagini metriche e possibilità di vettorializzazioni 2D e 3D.

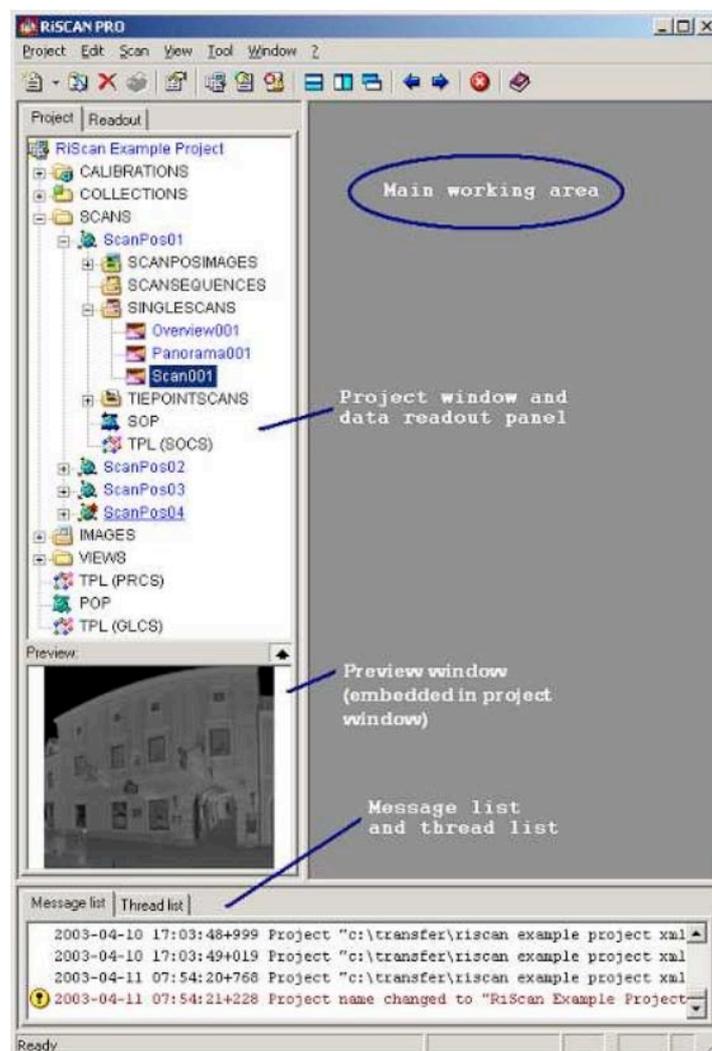


Figura 4.6 – Interfaccia grafica Main Window del software RiscanPro

Le fasi principali del software sono suddivise in:

- a) Acquisizione, visualizzazione e processamento;
- b) Avanzata modalità di unione e georeferenziazione;
- c) Interfacciamento con software di modellazione

Passiamo ora alla descrizione del programma nelle sue componenti principali per la realizzazione di un nuovo progetto. Il software è caratterizzato dall'interfaccia grafica Main Window (figura 4.6) suddivisa nelle sue aree di attinenza: Main Working Area, Project Window e Data Readout Panel, Preview Window e Message List. Dalla Main Window si accede al settaggio per ogni singola scansione.

La comunicazione tra PC e Scanner e tra PC, Scanner e Macchina Fotografica avviene tramite un cavo di rete tipo LAN RJ45, utilizzando un protocollo TCP/IP.

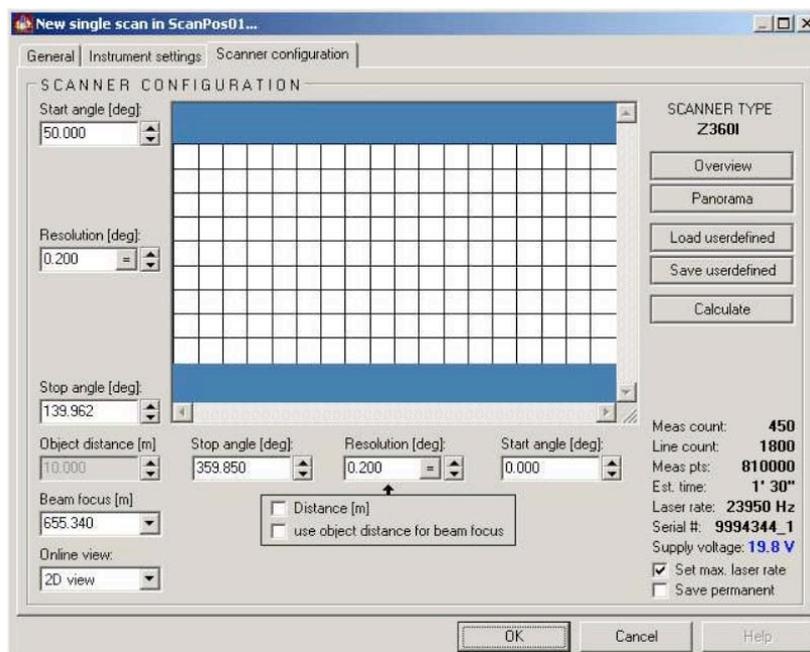


Figura 4.8 – Finestra New Single Scan pronta per una scansione

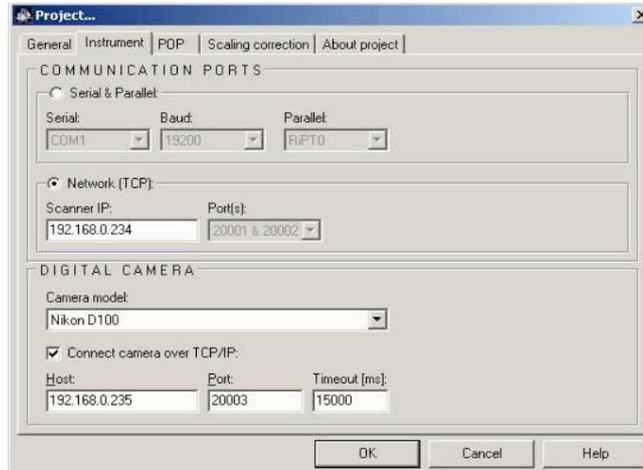


Figura 4.7 – Finestra di configurazione della rete locale (protocollo TCP/IP)

Eseguiti tutti i collegamenti viene controllata l'ortogonalità dello strumento a terra, processo controllato da una bolla digitale visibile tramite software.

Una volta inviato il comando New Single Scan appare un'area grigliata piana che rappresenta la nostra area di lavoro. Da qui si prosegue con una prima scansione di preview a 360° per individuare l'area e i targets posizionati; attraverso il comando Image Acquisition (dal quale si può verificare la calibrazione della macchina fotografica) si può effettuare l'acquisizione delle immagini della zona interessata; infine si prosegue con il settaggio degli altri parametri:

Distanza dell'oggetto: dopo aver indicato l'oggetto interessato sul modulo Preview il software calcolerà automaticamente la distanza e noi daremo una misura finita e di valore medio per l'oggetto interessato;

Risoluzione di acquisizione: viene dato il passo (verticale e orizzontale) desiderato, cioè quella densità di punti da rilevare.

Al termine dell'inserimento dei valori viene calcolato il tempo di scansione (calcolate) e poi si procede con la scansione.

4.4 PIANIFICAZIONE DEL RILIEVO E ANALISI DEI LUOGHI

La presenza di pendii molto ripidi nella zona oggetto di studio e le difficoltà incontrate in precedenti campagne di misura, effettuate allo scopo di acquisire dati pluviometrici e monitorare lo stato attuale del reticolo idrografico del ba-

cino, hanno evidenziato la necessità di una pianificazione del rilievo con il laser scanner terrestre. L'obiettivo principale era quello di individuare, seppure in modo approssimato, le posizioni ottimali per lo stazionamento dello strumento. Sulla base del DTM LiDAR del 2003 è stata quindi condotta un'analisi di visibilità in ArcGIS tenendo conto della morfologia dei versanti, degli aspetti logistici (strade e sentieri di accesso) e delle condizioni di sicurezza (attraverso il raster delle pendenze e fotografie della zona). Questa analisi non solo ha consentito di individuare tre possibili punti di stazionamento (S1, S2, S3 in figura 5) ma ha anche messo in evidenza la necessità di dover eseguire il rilievo con uno strumento TLS in grado di operare su distanze comprese tra 800 m e 1500 m.

Le prime operazioni di rilievo, avvenute in luglio 2008, sono state precedute da un'attenta analisi dei luoghi per il posizionamento della strumentazione GPS e Laser Scanner di rilievo. Di seguito si riporta uno schema grafico che rappresenta tali posizionamenti:



Figura 4.9 - FRANA RIO MIOZZA – Analisi preliminare area oggetto di indagine

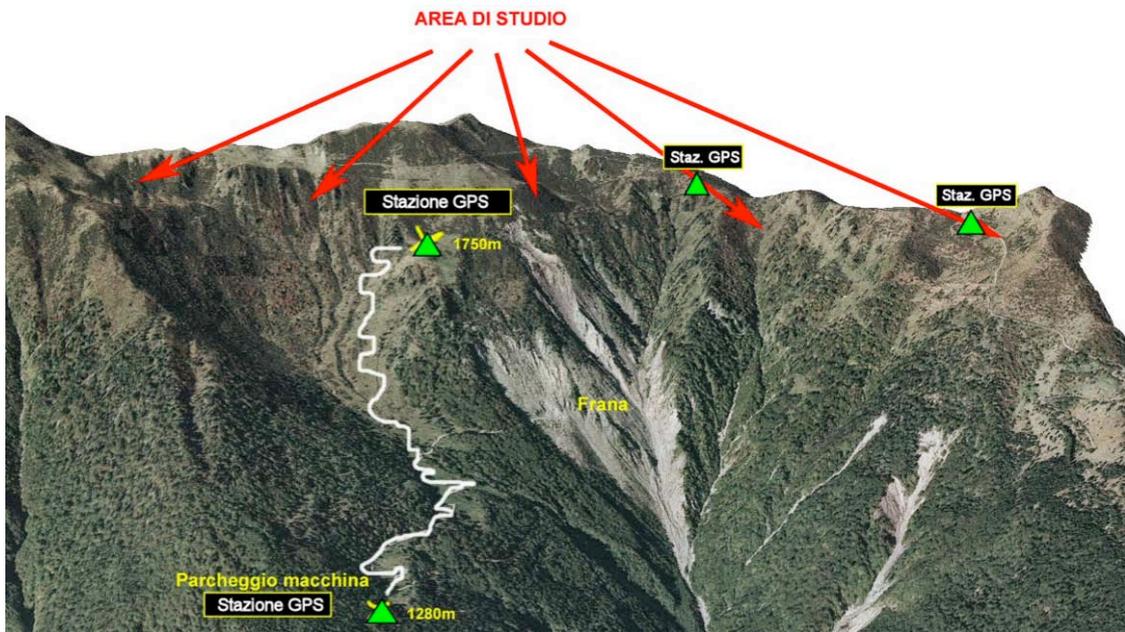


Figura 4.10 - FRANA RIO MIOZZA – Analisi posizionamento stazioni di rilievo

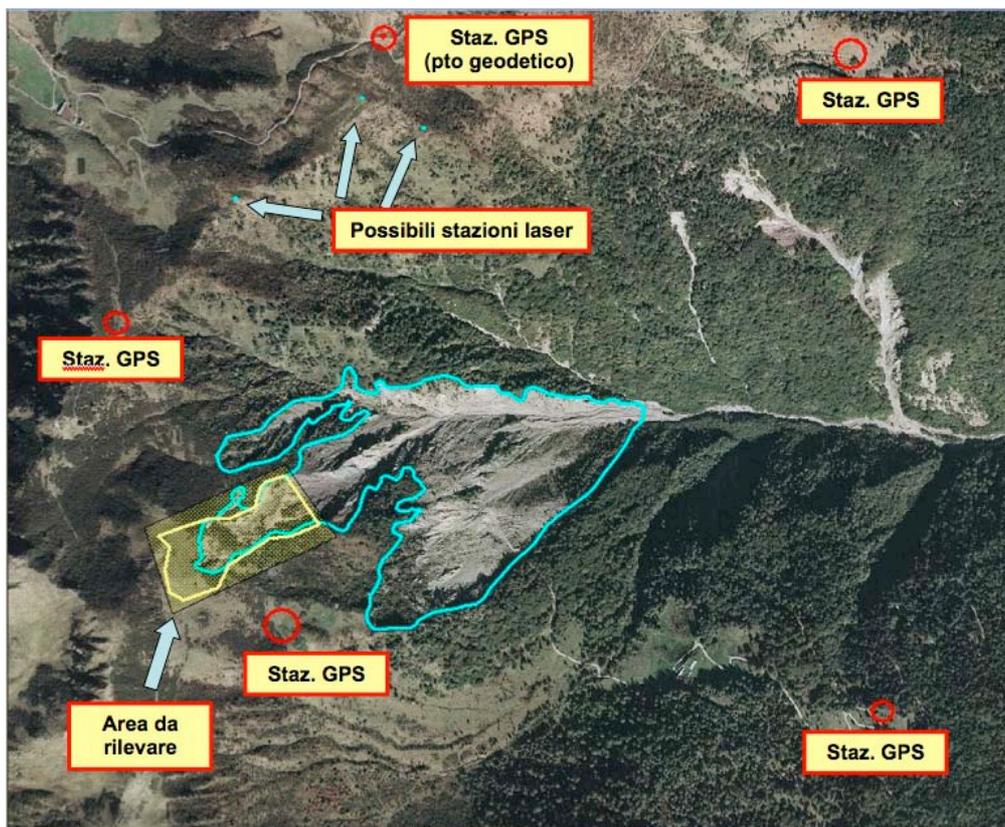


Figura 4.11 - FRANA RIO MIOZZA – Analisi posizionamento stazioni di rilievo

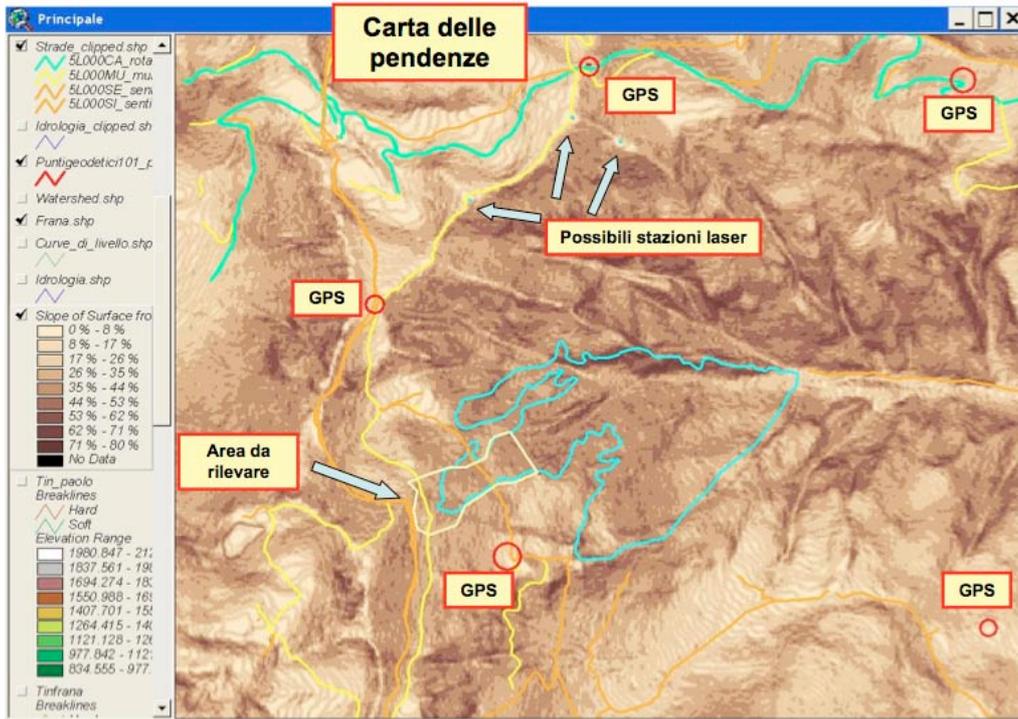


Figura 4.12 - FRANA RIO MIOZZA – Carta delle pendenze

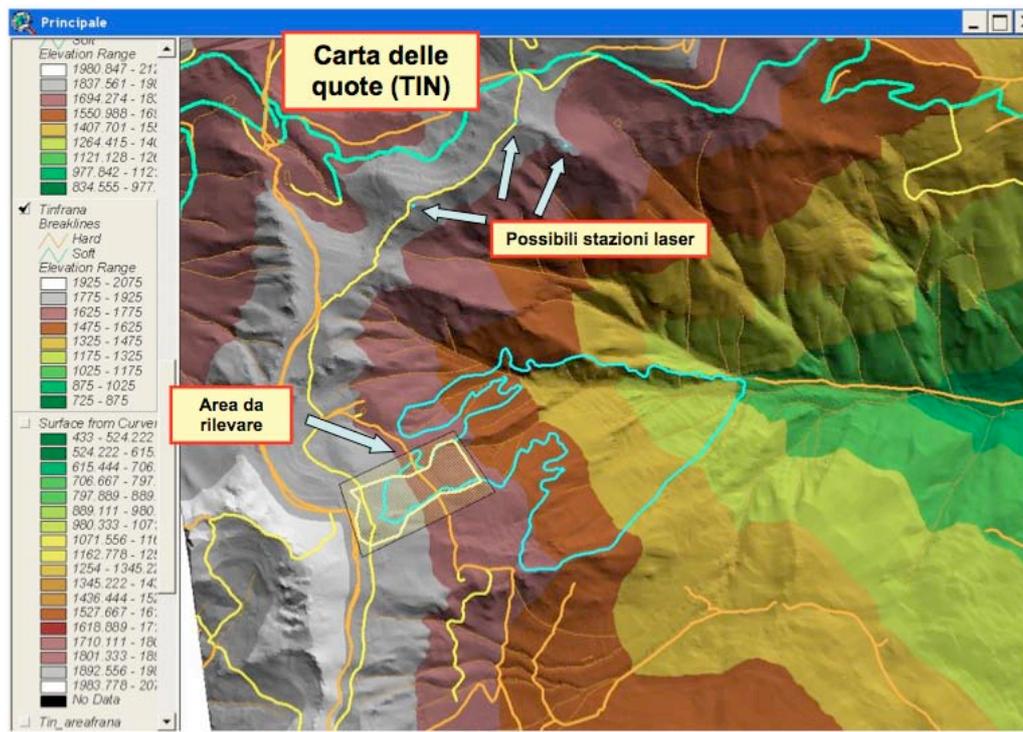


Figura 4.13 - FRANA RIO MIOZZA – Carta delle quote

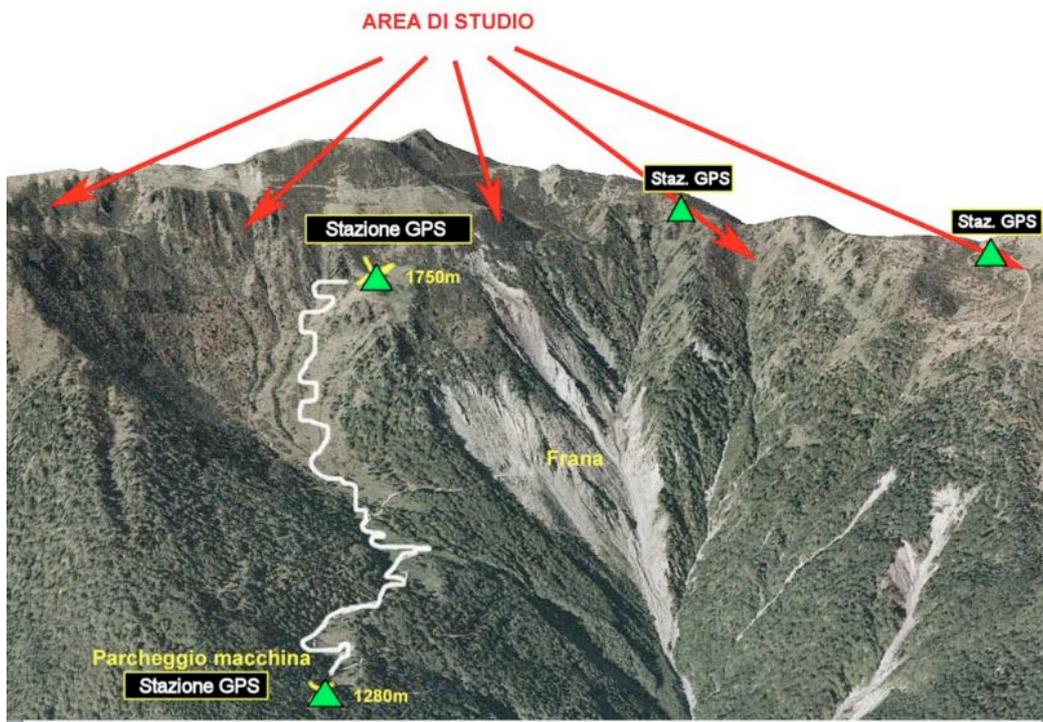


Figura 4.14 - FRANA RIO MIOZZA – Vista frontale della frana

4.5 RETE GPS





Figura 4.15 – Stazioni GPS durante le fasi di rilievo

Il rilievo della rete di inquadramento della frana è stato eseguito con strumentazione doppia frequenza GPS mista, composta da due ricevitori TOPCON HiPer Pro, un ricevitore Leica System 200 e un ricevitore Trimble 5700.

I cinque vertici della rete sono stati materializzati attraverso chiodi in acciaio opportunamente cementati nel terreno o in roccia in modo sia da consentire un loro successivo e facile ritrovamento, sia da evitarne possibili spostamenti a causa del passaggio della fauna locale. La distanza media tra i vertici della rete varia tra 500 m e 1,5 km.

Tali vertici sono stati misurati in modalità statica, con un tempo di stazionamento di 45 minuti in tre sessioni distinte, ottenendo in tal modo un numero sovrabbondante di osservazioni sufficiente per eseguire la compensazione della rete. Tale operazione è stata eseguita in modalità “rete libera” e “rete vincolata”, imponendo in quest’ultimo caso ad un vertice della rete le coordinate GPS ottenute a seguito di una baseline di 2 ore con la stazione permanente di Cercivento (UD) facente parte della rete per il controllo delle deformazioni della Regione Friuli Venezia Giulia, *FReDNet* (Friuli Regional Deformation network).

La compensazione della rete ha fornito degli scarti quadratici medi dell’ordine di 2-3 mm, sufficienti per il controllo temporale dei momenti di frana.

La complessità orografica della zona ha reso difficile accedere ai vertici della rete, la cui posizione era stata precedentemente pianificata in sede di progettazione del rilievo. Di conseguenza la campagna di misura GPS nell'area della frana del Rio Miozza ha richiesto due giornate di lavoro.

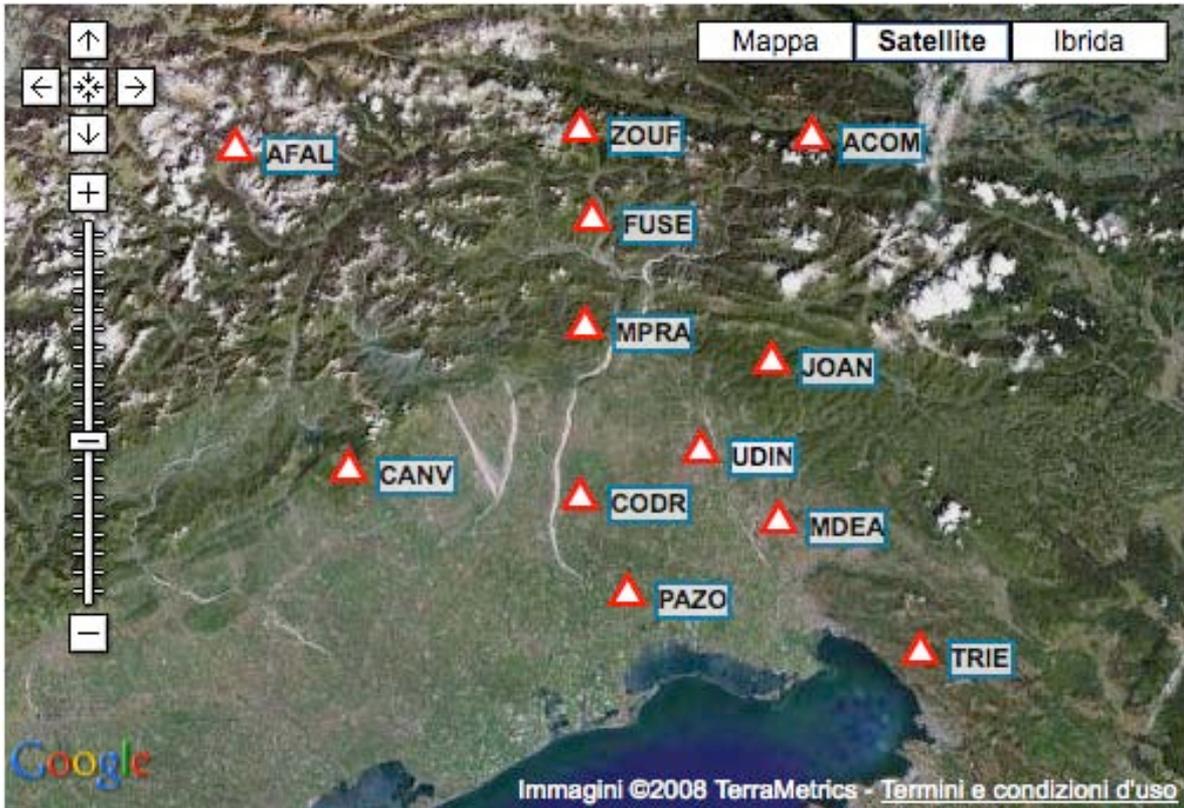


Figura 4.16 MAPPA DELLE WORKING GPS STATIONS – FReDNet

4.6 RILIEVO E ACQUISIZIONE

La tecnica laser scanner terrestre, sicuramente più vantaggiosa economicamente, non era mai stata utilizzata fino ad ora per un rilievo di simile dimensione e con lunghe distanze di misura, superiori al km. Solo da poco tempo è infatti disponibile in commercio il Riegl-Z620, primo (ed attualmente unico) laser scanner terrestre in grado di offrire una presa dati accurata fino ad una distanza di 2 km, unitamente ad una elevata precisione ed alta velocità di acquisizione dati.

Nel giugno del 2008 l'area di frana di interesse per lo studio in oggetto, estendentesi per circa 650 m in direzione verticale e 130 m in direzione orizzontale, è stata quindi completamente rilevata con il laser scanner Riegl LMS-

Z620, integrato da una fotocamera digitale Nikon D200 e da un ricevitore GPS doppia frequenza Topcon Hiper Pro. Dalla medesima stazione situata nella zona del punto S3, mostrato in figura 4.17, sono state acquisite alcune scansioni della frana posta ad una distanza variabile tra 800 e 1200 m, utilizzando un passo angolare di 0.03° ($\cong 50 \text{ cm @ } 1000 \text{ m}$) ed un campo di vista di $80^\circ \times 70^\circ$ (H x V). Con tali impostazioni è stato possibile rilevare un'area molto più ampia rispetto alla sola parte sommitale del corpo di frana, come mostrato in figura 4.17.

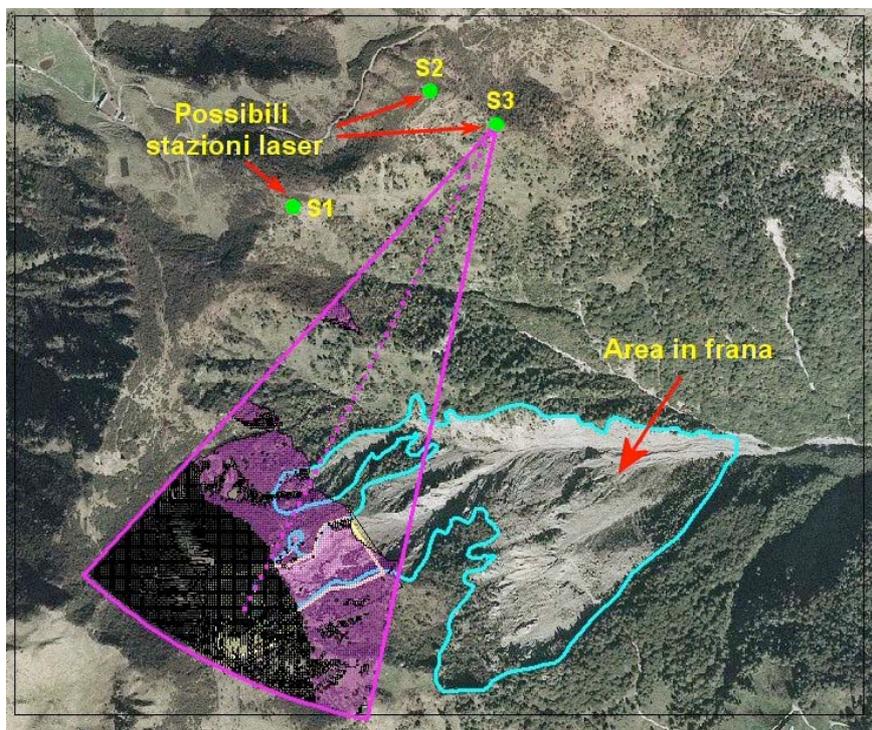


Figura 4.17: Mapa di visibilità realizzata in ArcGIS sul DTM LiDAR. Si distinguono le posizioni delle possibili stazioni laser terrestre, il perimetro del corpo di frana (in azzurro) e dell'area di interesse, alla sommità della frana (in giallo).

Il ricevitore GPS è stato utilizzato per poter georiferire il DTM laser terrestre nello stesso sistema di riferimento del DTM derivato dai dati LiDAR, in questo caso il sistema nazionale Gauss-Boaga. La possibilità di ricorrere per tale scopo ad una serie di target retroriflettenti come punti di controllo a terra (GCP) è stata scartata già nella fase di pianificazione del rilievo in seguito ad un'attenta valutazione della morfologia e dell'acclività del luogo, dei tempi ri-

chiesti e della necessità di dover operare in condizioni di massima sicurezza. Si è scelto pertanto di adottare il metodo della georeferenziazione diretta mediante collimazione di un target di orientamento (backsighting target) il cui centro è stato opportunamente misurato sia con il laser scanner sia con il GPS. Purtroppo, come evidenziato in (Alba et al., 2005) lo svantaggio di questa modalità operativa è costituito dalla minore precisione ottenibile nelle coordinate delle nuvole di punti acquisite.



Figura 4.18: Riegl LMS-Z620 con fotocamera digitale e GPS Topcon in acquisizione. Sullo sfondo è visibile l'area di frana principale.

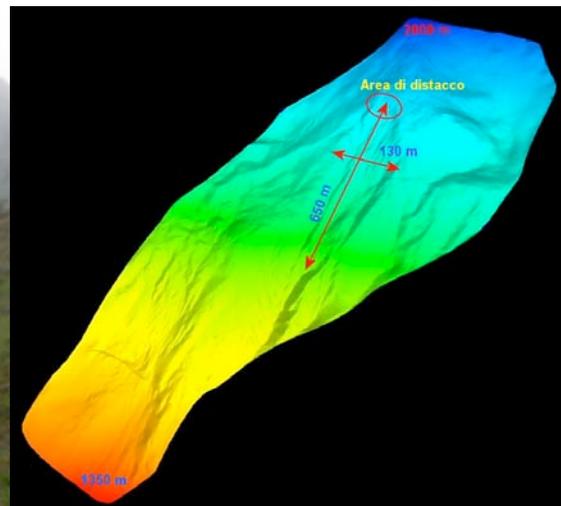


Figura 4.19: Modello 3D dell'area di frana principale renderizzato in falsi colori in funzione della quota.

Nel corso del rilievo con il Z620 le coordinate della stazione di presa sono state misurate tramite GPS in modalità RTK, impiegando come stazione di riferimento un secondo ricevitore Topcon Hiper Pro posizionato su un punto geodetico ritrovato nelle vicinanze. Poiché di tale punto non erano note le coordinate, due giorni prima del rilievo è stata eseguita un'osservazione statica di circa due ore, definendo una baseline con la stazione permanente di Cercivento (UD) facente parte della rete per il controllo delle deformazioni della Regione Friuli Venezia Giulia, FReDNet (Friuli Regional Deformation network).

Seguendo i punti principali del rilievo fotogrammetrico abbiamo posizionato il laser scanner frontalmente e ai lati per coprire gli eventuali coni d'ombra. In seguito abbiamo posizionato dei targets, che ci son stati di aiuto per

allineare le scansioni, in punti visibili allo strumento.



Figura 4.20 – Target sopra ad un treppiede durante le fasi di rilievo

Ogni ScanWorld è stata mappata mediante sistema GPS (vedi figura 4.18) composto da due antenne doppia frequenza L1 L2 Topcon Hiper Pro, utile per ottenere la georeferenziazione del modello 3D allineato. Di fatto è stata generata una rete di punti fissi esterni alle posizioni di rilievo mediante posizionamento di un ricevitore GPS in acquisizione continua dalle 6h alle 10h, utile a correggere la posizione del secondo ricevitore posizionato per un tempo di circa 30' nelle posizioni in cui il laser veniva posizionato.

Tutto questo seguendo lo schema grafico studiato nella ricognizione. La stessa procedura è stata utilizzata nei giorni successivi per le scansioni effettuate attorno alla frana.

I punti che sono stati individuati per posizionare il laser sono stati poi segnalati a terra con un chiodo; questo perchè in fasi successive saranno più facilmente rintracciabili per eventuali scansioni o utilizzati per la verifica di una corretta georeferenziazione del modello.

4.7 GEOREFERENZIAZIONE DEL MODELLO 3D

L'ultimo passo da eseguire al termine dell'allineamento delle scansioni: la georeferenziazione del modello 3D; ovvero l'orientamento del modello ottenuto, già in scala 1:1. Il sistema non sarà più quello di riferimento relativo, cioè della scansione di partenza dell'allineamento e sulla base della quale tutte le altre scansioni vengono allineate, bensì il reale orientamento dell'Abbazia nel sistema di riferimento assoluto, ovvero quello terrestre. Per fare questo, come già anticipato all'inizio del capitolo, è stato utilizzato un sistema GPS composto da due ricevitori doppia frequenza Topcon Hiper Pro (acquisizione satelliti GPS americani e GLONASS russi), con i quali è stata acquisita per un tempo sufficiente la posizione di ogni singola posizione in cui il laser veniva posizionato, a meno della ScanWorld n. 11, posizionata al di sotto di un portico del chiostro. Le coordinate rilevate sono state assegnate a ciascuna posizione mediante Software Cyclone al termine dell'allineamento, permettendo di orientare il modello in termini assoluti. Segue lo schema delle singole prese GPS con la relativa posizione debitamente corretta all'acquisizione della base di riferimento, in coordinate WGS84.

4.8 MODELLO 3D DELLA FRANA RIO MIOZZA

Di seguito vengono mostrate alcune immagini del modello 3D finale ottenute dal laser terrestre Riegl LMS-Z620 con differenti Global Color Map (RGB, HUE e colore lineare bianco/magenta per evidenziare le due singole scansioni) ottenuto tramite allineamento di scansioni effettuate durante le campagne di rilievo anni 2008, 2009, 2010 con il laser Riegl LMS-Z620; il Color Mapping della nuvola dei punti permette una visualizzazione sia nella colorazione B/N (scala lineare) che in quella HUE (intensità d'interazione tra la lunghezza d'onda del laser e il materiale della superficie dell'oggetto colpito: la gradazione passa dal rosso – zone più scure e più distanti dal laser – al blu – zone più chiare e più vicine al laser).

SCW 2:

TOTAL SCANS: 1

PROBE RANGE: 800 m

SAMPLE SPACING: 50 x 50 cm

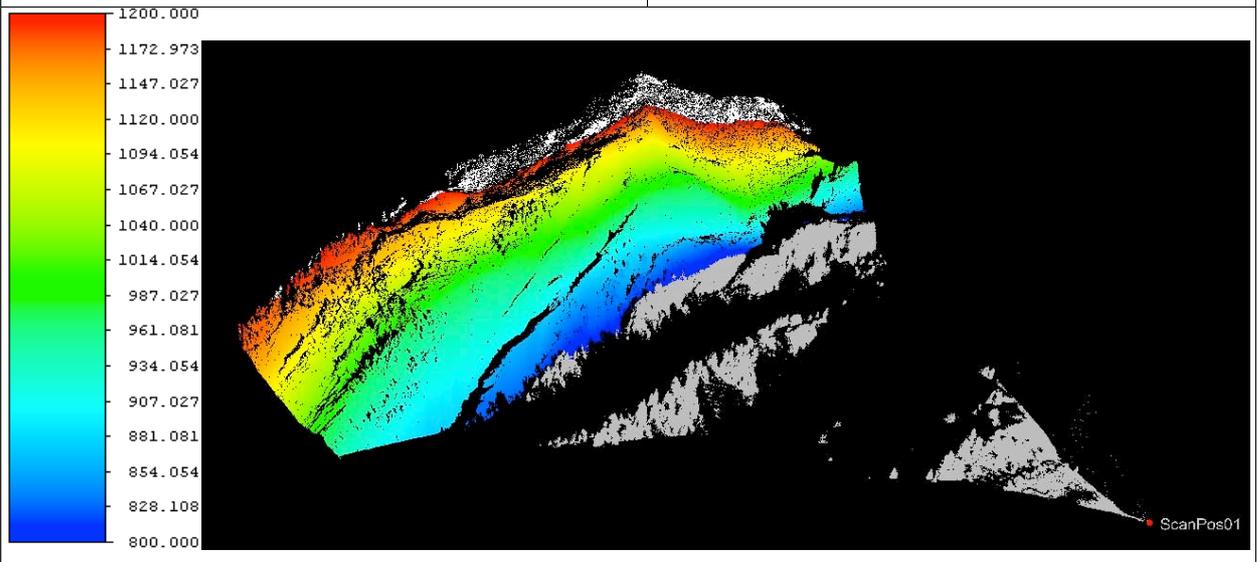
IMAGE: High resolution

REAL TIME: 1

NOTE:

Scansione globale ripresa nella
campagna di rilievo di agosto 2010

Tipo colorazione HUE



SCW 1:

TOTAL SCANS: 1

PROBE RANGE: 800 m

SAMPLE SPACING: 50 x 50 cm

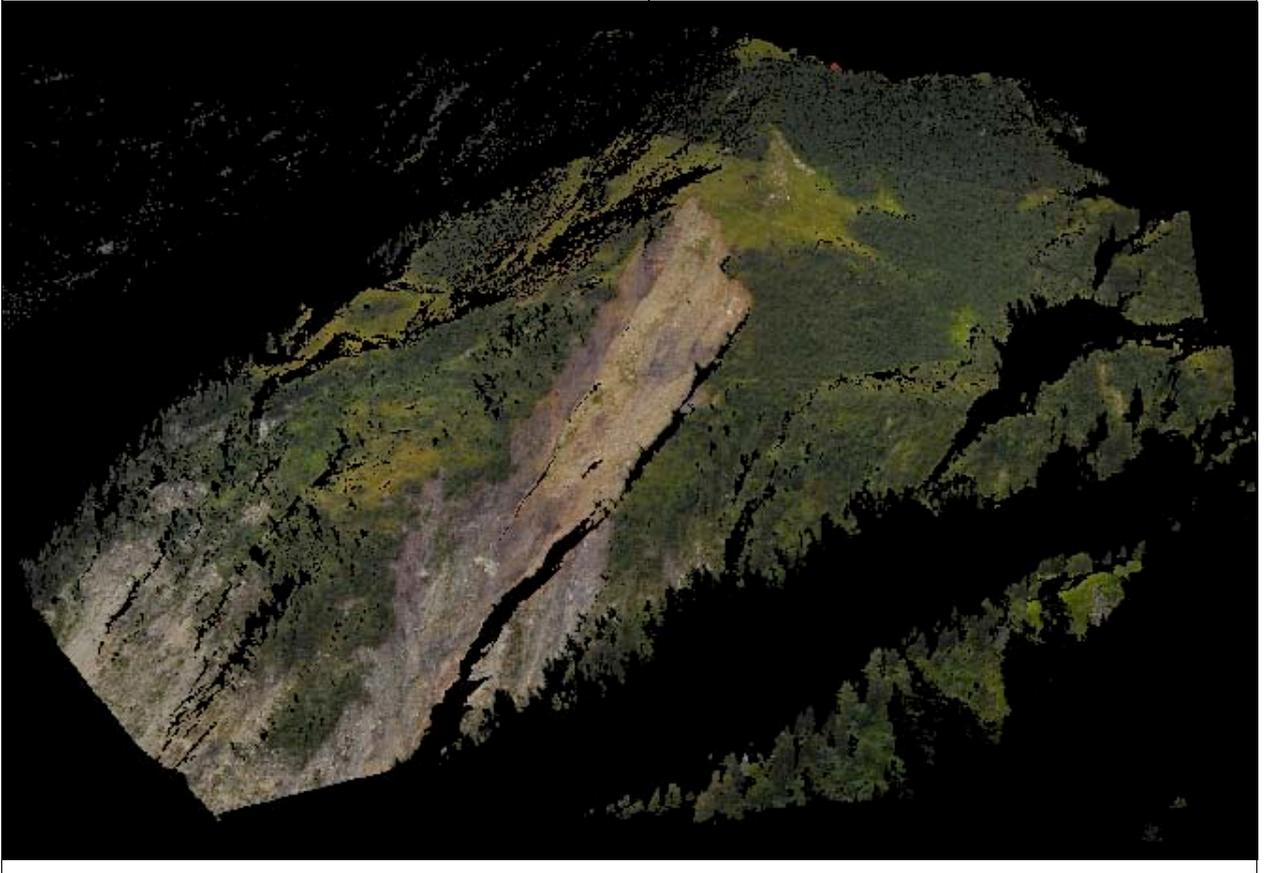
IMAGE: High resolution

REAL TIME: 1

NOTE:

Scansione globale ripresa nella
campagna di rilievo di agosto 2009

Tipo colorazione RGB



SCW 1:

TOTAL SCANS: 1

PROBE RANGE: 800 m

SAMPLE SPACING: 50 x 50 cm

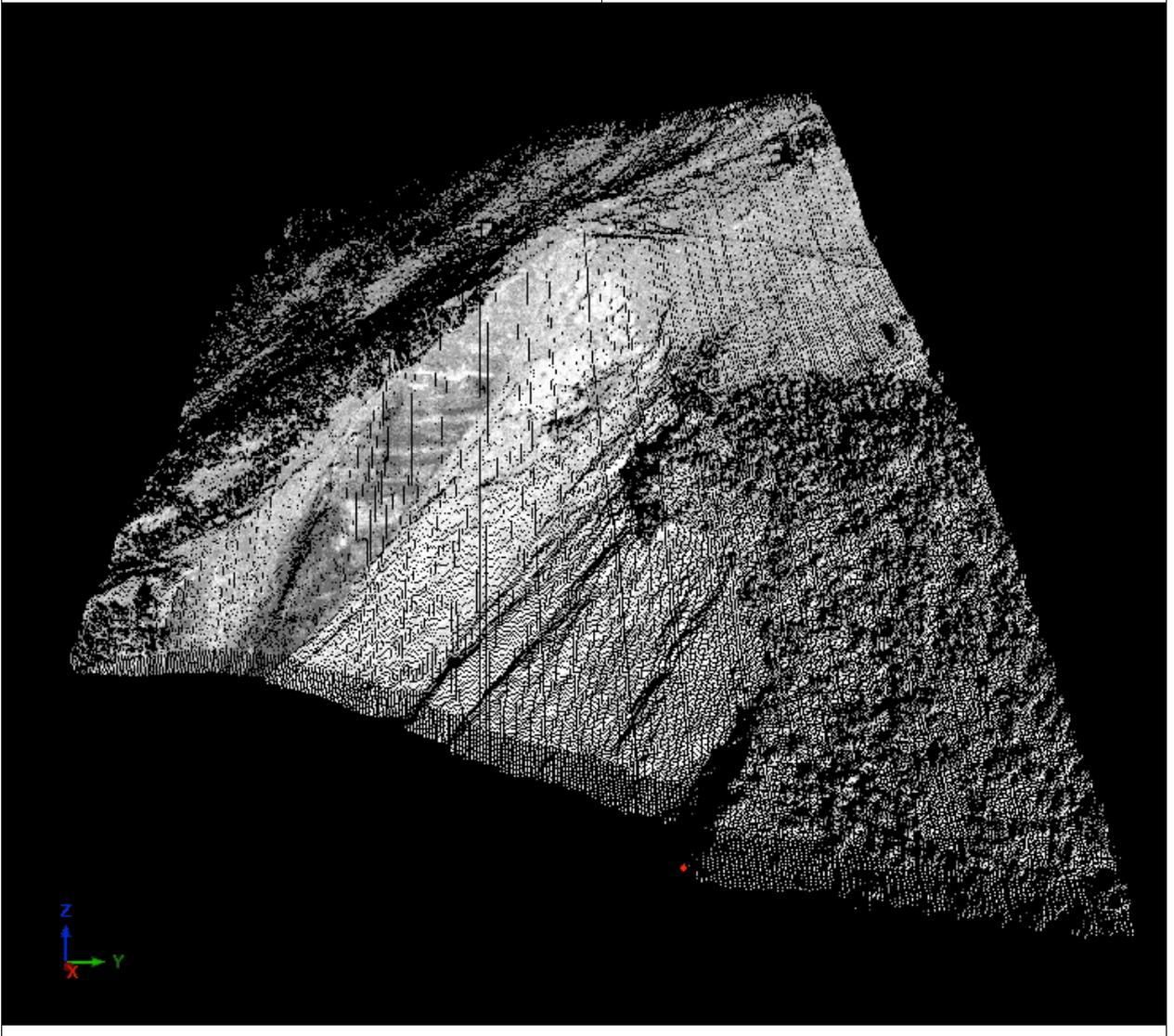
IMAGE: High resolution

REAL TIME: 1

NOTE:

Scansione globale ripresa nella
campagna di rilievo di agosto 2010

Tipo colorazione B/N



SCW 1:

TOTAL SCANS: 1

PROBE RANGE: 800 m

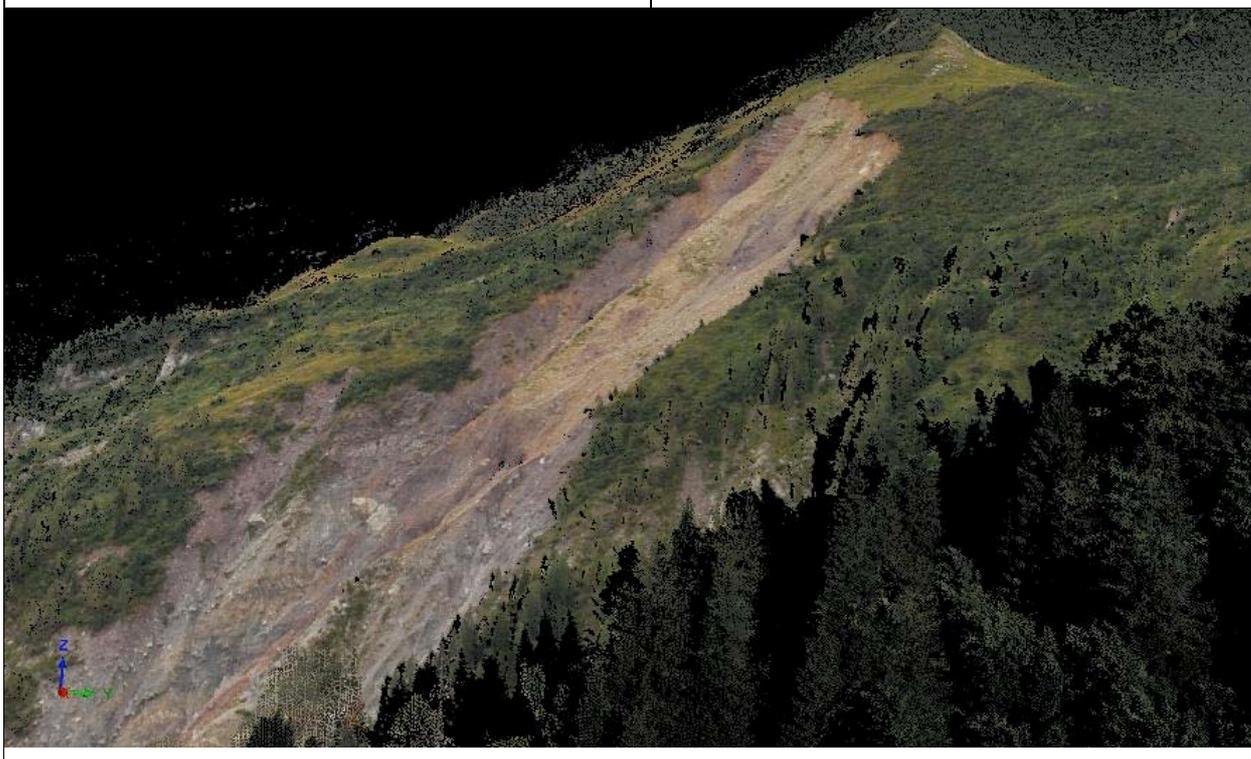
SAMPLE SPACING: 50 x 50 cm

IMAGE: High resolution

REAL TIME: 1

NOTE:Scansione globale ripresa nella
campagna di rilievo di agosto 2010

Tipo colorazione RGB



L'utilizzo di target per l'allineamento delle scansioni ha una funzione indiretta. I target vengono riconosciuti automaticamente dal laser in fase di acquisizione e la loro posizione ben individuata all'interno della scansione.

La singola scansione riporta il dato RGB proveniente dall'immagine acquisita dalla fotocamera Nikon D90 inserita al di sopra dello strumento mediante staffe cablate di produzione Riegl e collegata tramite cavo USB al computer e al software di acquisizione.

L'allineamento delle scansioni avviene esclusivamente mediante dato GPS, utilizzando il software RiscanPro. Nessun punto omologo da individuare! ogni scansione viene dal software già orientata assolutamente tramite inserimento del dato GPS corrispondente alle posizioni della scansione e del target di riferimento. Applicando questa metodologia ad entrambe le scansioni

acquisite si ottiene il modello 3D già georiferito.

Per fare questo, è stato utilizzato il sistema GPS composto da due ricevitori doppia frequenza Topcon Hiper Pro (acquisizione satelliti GPS americani e GLONASS russi), con i quali è stata acquisita per un tempo sufficiente la posizione di ogni singola posizione laser e target: per il laser viene installato il GPS al di sopra della camera fotografica, in asse con lo 0 del laser, mediante staffa metallica di fabbricazione Riegli; per il target invece si è posizionata l'antenna al di sopra del tricuspide legato ad un treppiedi, sopra il quale era vincolato il target stesso.

La rete di inquadramento viene descritta nel capitolo successivo mediante uno schema riassuntivo.

4.9 ANALISI DI MONITORAGGIO

4.9.1 MONITORAGGIO 2009

I risultati ottenuti da queste applicazioni evidenziano le enormi potenzialità dell'utilizzo della tecnologia laser-scanner terrestre per la restituzione di modelli tridimensionali utili al monitoraggio dei pendii soggetti a dissesti idrogeologici. Il lavoro svolto trattando i dati ottenuti da rilievi eseguiti fino al 2008 ha permesso, attraverso l'integrazione di rilievi LiDAR aerei con misure da laser scanner terrestre, di:

1) produrre DTM di qualità e dettaglio superiori, benchè su aree più ristrette, migliorando localmente le capacità di analisi e modellazione di eventi franosi rispetto a quanto ottenibile con sole misure ALS

2) operare in zone impervie o di difficile accesso, acquisendo dati anche in quelle zone dove la morfologia del luogo può impedire un rilievo completo del territorio tramite laser aereo.

La valutazione del laser scanner terrestre come strumento per il monitoraggio e l'analisi degli eventi franosi che interessano il bacino del Miozza non si esaurisce con il lavoro presentato. Si è ritenuto infatti necessario approfondire in particolare due argomenti: il confronto tra lo studio di bacini montani sulla base di soli dati LiDAR o TLS e la quantificazione dei movimenti franosi attraverso rilievi TLS multitemporali, motivo per cui è stata condotta una

seconda campagna di rilievo presso la frana, a cavaliere di settembre/ottobre 2009, mediante strumentazione GPS e TLS.



Figura 4.21:
Rilievo GPS frana Miozza - ottobre 2009



Figura 4.22:
Briefing rilievo frana Miozza - ottobre 2009

4.9.2 MONITORAGGIO 2010

Ad agosto del 2010 è stata condotta un'ulteriore analisi del sito mediante utilizzo della tecnologia laser-scanner terrestre. Il lavoro svolto trattando i dati ottenuti da rilievi eseguiti fino al 2009 ha permesso, attraverso l'integrazione di rilievi LiDAR aerei con misure da laser scanner terrestre, di:

1) produrre un ulteriore DTM di qualità e dettaglio superiori a quello già restituito negli anni precedenti, migliorando localmente le capacità di analisi e modellazione di eventi franosi rispetto a quanto ottenuto;

2) confrontare la situazione rilevata con quanto ottenuto durante le campagne di rilievo degli anni precedenti, ovvero lo studio del bacino montano sulla base dei dati LiDAR o TLS e la quantificazione dei movimenti franosi attraverso i rilievi TLS eseguiti nelle campagne del 2009 e 2010 mediante strumentazione GPS e TLS.

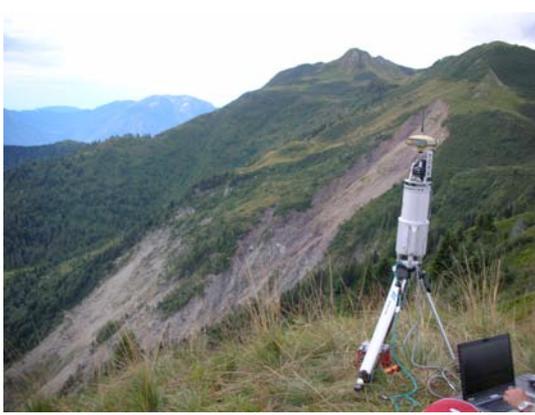


Figura 4.22:
Rilievo frana Rio Miozza - agosto 2010



Figura 4.23:
Stato della frana Rio Miozza - agosto 2010

Di seguito si riportano alcuni snap (Fig. 4.24, 4,25) del modello 3D completato a seguito dei rilievi del 2010. Si considera di avere dati sufficienti per poter completare il confronto tra i modelli e stabilire il comportamento dell'evento franoso, anche in relazione al calcolo del volume della frana stessa.

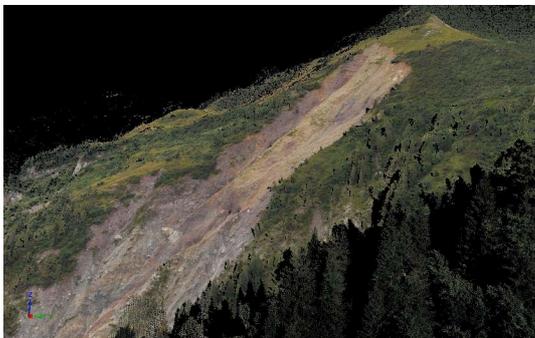


Figura 4.24:
Modello 3D frana Rio Miozza - agosto 2010

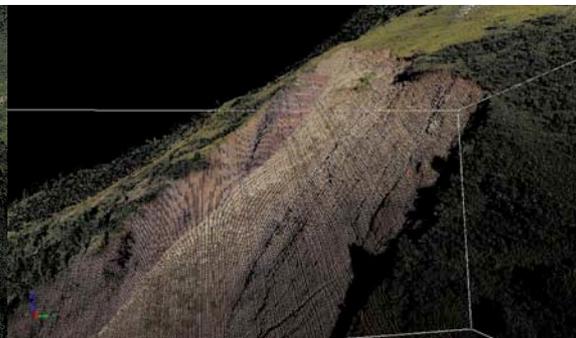


Figura 4.25:
Particolare rilievo 3D frana Rio Miozza - agosto 2010

4.9.3 MONITORAGGIO 2011

Nella fase di elaborazione dei dati acquisiti si è proceduto dapprima alla rimozione della vegetazione presente nelle scansioni acquisite con il laser terrestre mediante una procedura di filtraggio semi-automatico implementata in RiSCANPRO. Operando sempre all'interno di questo software, la nuvola di punti risultante è stata quindi georiferita sui dati LiDAR del 2003. Allo scopo,

onde migliorare la precisione di georeferenziazione ottenibile con il metodo di orientamento su punto noto descritto in precedenza, la co-registrazione tra dati TLS e LiDAR è stata rafforzata sfruttando la procedura di allineamento automatica (Multi-Station-Adjustment) implementata in RiSCANPRO e basata sull'algoritmo ICP (Iterative Closest Point). Allo scopo, data l'ampia estensione di versante rilevato con il Riegl Z620, sono state utilizzate le zone di sovrapposizione tra la nuvola di punti LiDAR e quella TLS, esterne al corpo di frana principale. Il risultato di questa operazione, nella quale la nuvola di punti acquisita con il TLS e texturizzata con le immagini della fotocamera digitale Nikon D200, appare correttamente sovrapposta ai dati LiDAR.

Successivamente, i DTM ottenuti a partire dalle misure acquisite con le due strumentazioni laser (Riegl Z620 e Optech ALTM 3033) sono stati confrontati tra loro.

4.10 ANALISI VOLUMETRICA

Nella fase di elaborazione dei dati acquisiti si è proceduto dapprima alla rimozione della vegetazione presente nelle scansioni acquisite con il laser terrestre mediante una procedura di filtraggio semi-automatico implementata in RiSCANPRO. Operando sempre all'interno di questo software, la nuvola di punti risultante è stata quindi georiferita sui dati LiDAR del 2003. Allo scopo, onde migliorare la precisione di georeferenziazione ottenibile con il metodo di orientamento su punto noto descritto in precedenza, la co-registrazione tra dati TLS e LiDAR è stata rafforzata sfruttando la procedura di allineamento automatica (Multi-Station-Adjustment) implementata in RiSCANPRO e basata sull'algoritmo ICP (Iterative Closest Point). Allo scopo, data l'ampia estensione di versante rilevato con il Riegl Z620, sono state utilizzate le zone di sovrapposizione tra la nuvola di punti LiDAR e quella TLS, esterne al corpo di frana principale. Il risultato di questa operazione è mostrato in figura 4.26, nella quale la nuvola di punti acquisita con il TLS e texturizzata con le immagini della fotocamera digitale Nikon D200, appare correttamente sovrapposta ai dati LiDAR. Successivamente, i DTM ottenuti a partire dalle misure acquisite con le due strumentazioni laser (Riegl Z620 e Optech ALTM 3033) sono stati confrontati tra loro. La compa-

razione volumetrica ha evidenziato una mobilitazione massiccia di materiale nella parte superiore della frana (circa 221000 m³) ed una parziale deposizione nelle zone inferiori (circa 63000 m³), come mostrato nelle figure 4.27 e 4.28. I valori ottenuti sono risultati in accordo con quanto emerso nell'ambito di precedenti studi condotti nella medesima area attraverso il confronto tra DEM derivati però solamente da misure ALS (Massari et al., 2007) acquisite anche in questo caso prima e dopo l'evento franoso.

La fase di elaborazione dei dati è stata svolta all'interno del software RiSCANPRO secondo lo schema seguente:

- rimozione della vegetazione presente nelle scansioni TLS tramite filtraggio semi-automatico implementata nel software;
- georeferenziazione del DTM TLS nel SdR LiDAR, mediante attribuzione delle coordinate Gauss-Boaga ai due punti misurati con GPS-RTK e calcolo della trasformazione tra SdR laser e SdR Roma40;
- raffinamento della georeferenziazione attraverso la procedura di allineamento automatica MSA (Multi-Station-Adjustment) basata sull'algoritmo ICP (Iterative Closest Point);
- comparazione volumetrica tra i due DTM derivati dalle misure TLS e ALS.

Sono state utilizzate le zone di sovrapposizione tra la nuvola di punti LiDAR (verde), dal DTM LiDAR del 2003 e quella TLS (azzurro), esterne al corpo di frana principale il tutto visibile nella figura 4.26.

Il risultato di questa operazione consiste nel fatto che la nuvola di punti acquisita con il TLS e texturizzata con le immagini della fotocamera digitale Nikon D90, appare correttamente sovrapposta **ai dati LiDAR**.

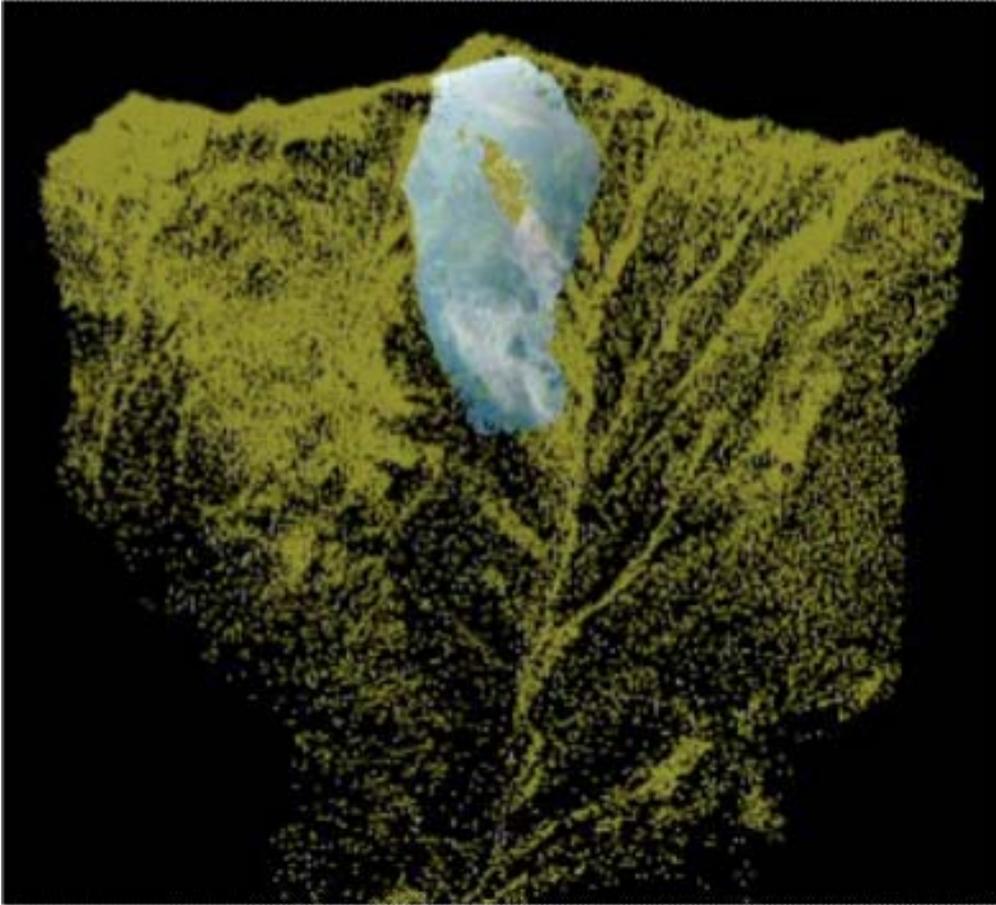


Figura 4.26: Sovrapposizione DTM Lidar 2003 con rilievo TLS 2010

Il confronto tra i due DTM ha evidenziato una mobilitazione massiccia di materiale:

221000 m³ nella parte superiore della frana

ed una parziale deposizione:

63000 m³ nelle zone inferiori

I valori ottenuti sono risultati in accordo con quanto emerso nell'ambito di precedenti studi condotti nella medesima area attraverso il confronto tra DTM derivati però solamente da misure ALS acquisite anche in questo caso prima e dopo l'evento franoso.

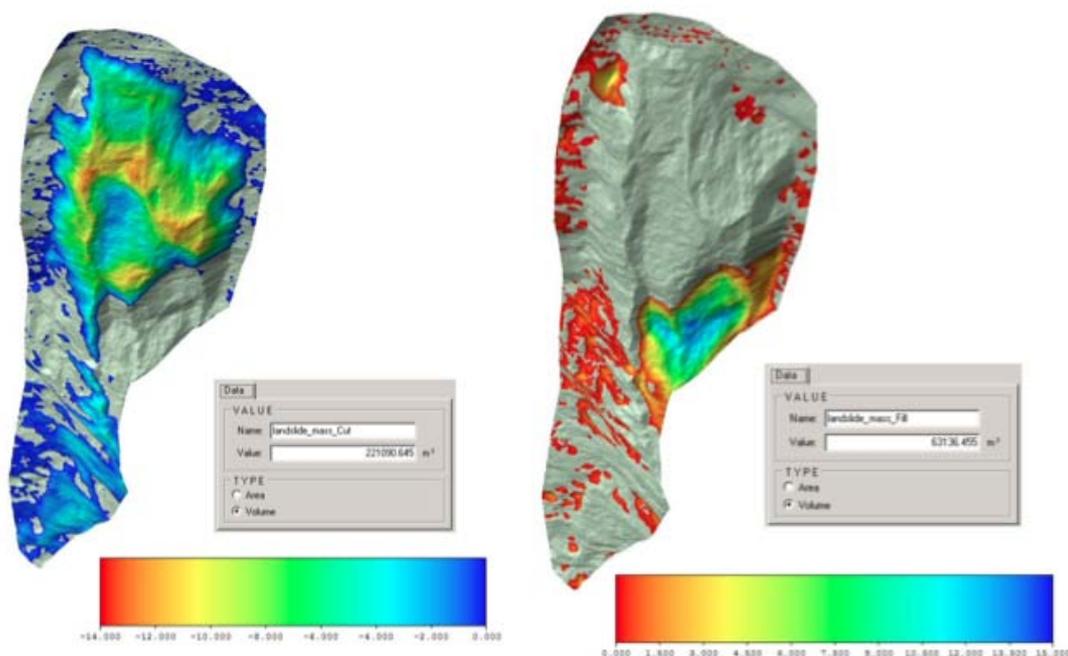


Figura 4.27: Volume di materiale detritico smobilitato alla sommità della frana **Figura 4.28:** Depositato alla base della frana

I risultati ottenuti da queste applicazioni evidenziano le enormi potenzialità dell'utilizzo della tecnologia laser-scanner terrestre per la restituzione di modelli tridimensionali utili al monitoraggio dei pendii soggetti a dissesti idrogeologici.

Il lavoro svolto dimostra che attraverso l'integrazione di rilievi LiDAR aerei con misure da laser scanner terrestre è possibile:

- produrre DTM di qualità e dettaglio superiori, benchè su aree più ristrette, migliorando localmente le capacità di analisi e modellazione di eventi franosi rispetto a quanto ottenibile con sole misure ALS,
- operare in zone impervie o di difficile accesso, acquisendo dati anche in quelle zone dove la morfologia del luogo può impedire un rilievo completo del territorio tramite laser aereo.

Ultima analisi della frana consiste nel monitorare e valutare l'arretramento della frana sul lato destro della corona; mentre si vede chiaramente come sia rimasta inalterata l'area potenzialmente instabile a monte del sentiero e immediatamente a valle di questo.



Figura 4.28: 2009



Figura 4.29: 2010

CAPITOLO 5.

SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI

5.1 RISULTATI RETE GPS

5.1.1 RETE GPS

Il rilievo della rete di inquadramento della frana è stato eseguito con strumentazione doppia frequenza GPS mista, composta da due ricevitori TOPCON HiPer Pro, un ricevitore Leica System 200 e un ricevitore Trimble 5700.

I cinque vertici della rete sono stati materializzati attraverso chiodi in acciaio opportunamente cementati nel terreno o in roccia in modo sia da consentire un loro successivo e facile ritrovamento, sia da evitarne possibili spostamenti a causa del passaggio della fauna locale. La distanza media tra i vertici della rete varia tra 500 m e 1,5 km.



Figura 5.1.1 – Vertici della rete GPS

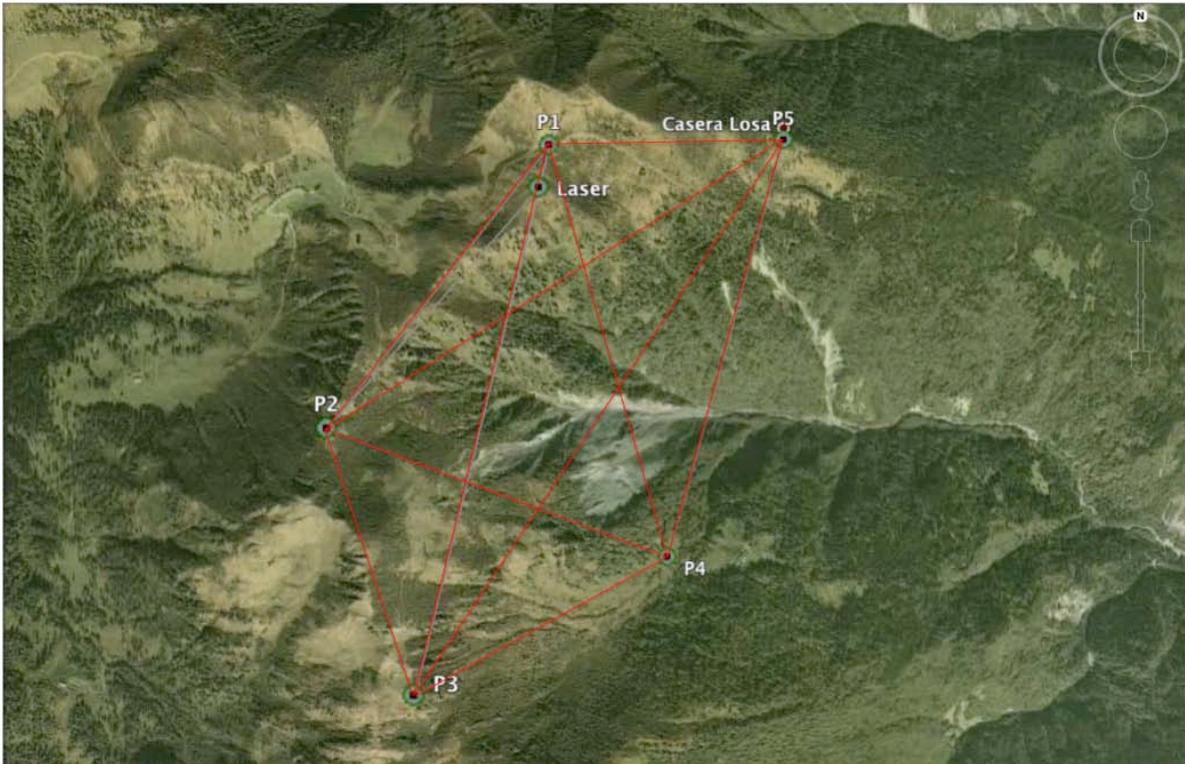


Figura 5.1.2 – Vertici della rete GPS - particolare

Tali vertici sono stati misurati in modalità statica, con un tempo di stazionamento di 45 minuti in tre sessioni distinte, ottenendo in tal modo un numero sovrabbondante di osservazioni sufficiente per eseguire la compensazione della rete. Tale operazione è stata eseguita in modalità “rete libera” e “rete vincolata”, imponendo in quest’ultimo caso ad un vertice della rete le coordinate GPS ottenute a seguito di una baseline di 2 ore con la stazione permanente di Cercivento (UD) facente parte della rete per il controllo delle deformazioni della Regione Friuli Venezia Giulia, *FReDNet* (Friuli Regional Deformation network).

La compensazione della rete ha fornito degli scarti quadratici medi dell’ordine di 2-3 mm, sufficienti per il controllo temporale dei momenti di frana.

La complessità orografica della zona ha reso difficile accedere ai vertici della rete, la cui posizione era stata precedentemente pianificata in sede di progettazione del rilievo. Di conseguenza la campagna di misura GPS nell’area della frana del Rio Miozza ha richiesto due giornate di lavoro.

CAMPAGNA DI RILIEVO 2008	
POS 1 h 1.81 Start 8.51 9 GPS + 6 GLONASS Stop 15.48 10 GPS + 5 GLONASS	N 5150550,015 E 332000,971 H 1876,414
POS 2 H 1.555 piano treppiede Start 9.32 8 GPS + 6 GLONASS Stop 15.54 9 GPS + 6 GLONASS	N 5149607,547 E 331281,389 H 1962,640
POS 3 H 1.646 Start 10.28 9 GPS + 6 GLONASS Stop 15.45 8 GPS + 7 GLONASS	N 5148771,482 E 331550,312 H 1982,293
POS 4 H 1.266 piano treppiede Start 10.31 12 GPS + 9 GLONASS Stop 16.00 11 GPS + 6 GLONASS	N 5149162,421 E 332377,049 H 1466,066
POS 5 H 1.61 Start 9.40 10 GPS + 7 GLONASS Stop 15.38 11 GPS + 7 GLONASS	N 5150633,943 E 332827,745 H 1654,324
LASER	N 5150398,941 E 331964,352 H 1892,764

CAMPAGNA DI RILIEVO 2009	
POS 1 h 1.81 Start 9.10 8 GPS + 7 GLONASS Stop 15.38 10 GPS + 5 GLONASS	N 5150550,012 E 332000,972 H 1876,414
POS 2 H 1.58 piano treppiede Start 9.27 8 GPS + 6 GLONASS Stop 15.52 7 GPS + 6 GLONASS	N 5149607,549 E 331281,386 H 1962,642
POS 3 H 1.655 Start 10.10 9 GPS + 6 GLONASS Stop 15.40 10 GPS + 6 GLONASS	N 5148771,481 E 331550,312 H 1982,295
POS 4 H 1.272 piano treppiede Start 10.03 10 GPS + 9 GLONASS Stop 16.01 10 GPS + 7 GLONASS	N 5149162,423 E 332377,047 H 1466,068
POS 5 H 1.691 Start 9.33 10 GPS + 6 GLONASS Stop 14.55 11 GPS + 7 GLONASS	N 5150633,943 E 332827,746 H 1654,323
LASER	N 5150398,944 E 331964,353 H 1892,764

CAMPAGNA DI RILIEVO 2010	
POS 1 h 1.783 Start 9.21 8 GPS + 6 GLONASS Stop 15.13 10 GPS + 4 GLONASS	N 5150550,014 E 332000,969 H 1876,414
POS 2 H 1.628 piano treppiede Start 10.12 7 GPS + 6 GLONASS Stop 16.05 9 GPS + 6 GLONASS	N 5149607,548 E 331281,388 H 1962,641
POS 3 H 1.660 Start 10.08 9 GPS + 5 GLONASS Stop 16.35 8 GPS + 8 GLONASS	N 5148771,484 E 331550,313 H 1982,293
POS 4 H 1.422 piano treppiede Start 10.17 10 GPS + 9 GLONASS Stop 16.22 11 GPS + 6 GLONASS	N 5149162,420 E 332377,048 H 1466,064
POS 5 H 1.588 Start 10.20 9 GPS + 6 GLONASS Stop 15.56 10 GPS + 7 GLONASS	N 5150633,945 E 332827,744 H 1654,322
LASER	N 5150398,939 E 331964,350 H 1892,762

Segue la sovrapposizione dello schema totale delle coordinate su google maps strumento utile a verificare la bontà delle prese. (SCW=EST)

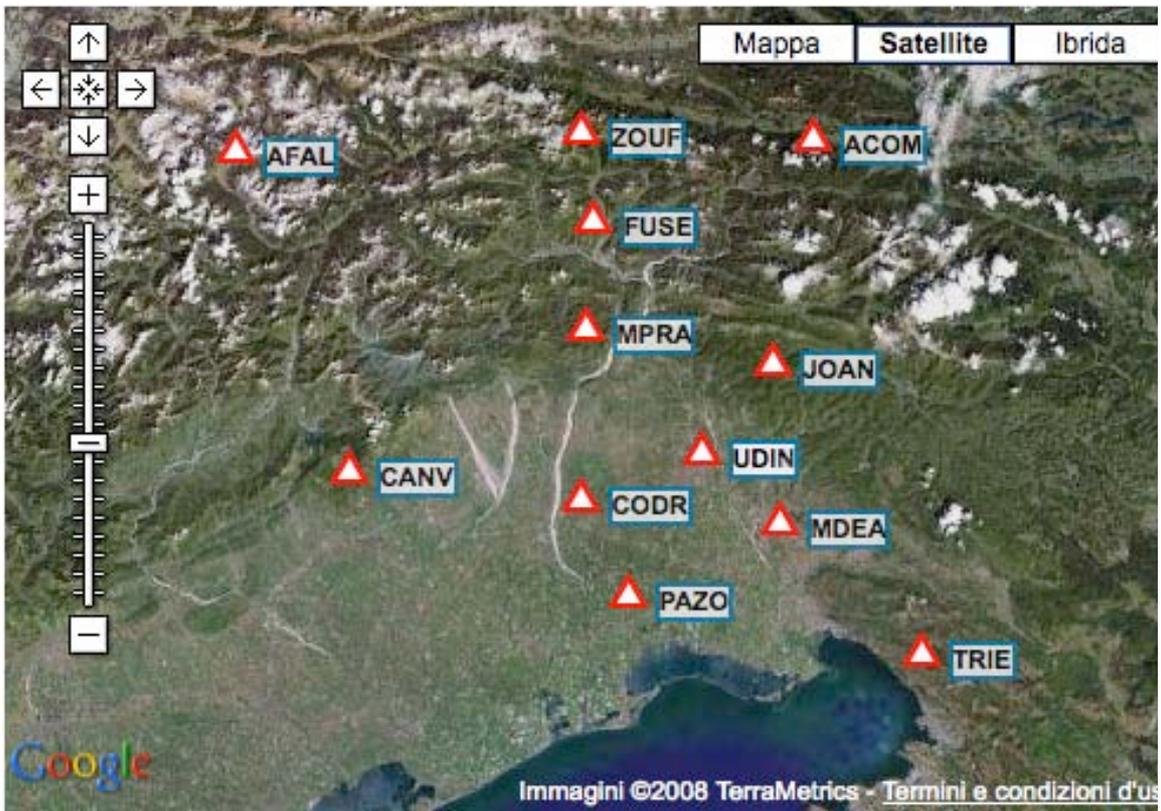


Figura 5.2 – Vertici della rete GPS

5.1.2 CONFRONTO COORDINATE RETE DI APPOGGIO 5 punti fissi

Vertice rete	2008		2009		2010	
S1	N	5150550,015	N	5150550,012	N	5150550,014
	E	332000,971	E	332000,972	E	332000,969
	Q	1876,414	Q	1876,414	Q	1876,414
S2	N	5149607,547	N	5149607,549	N	5149607,548
	E	331281,389	E	331281,386	E	331281,388
	Q	1962,640	Q	1962,642	Q	1962,641
S3	N	5148771,482	N	5148771,481	N	5148771,484
	E	331550,312	E	331550,312	E	331550,313
	Q	1982,293	Q	1982,295	Q	1982,293
S4	N	5149162,421	N	5149162,423	N	5149162,420
	E	332377,049	E	332377,047	E	332377,048
	Q	1466,066	Q	1466,068	Q	1466,064
S5	N	5150633,943	N	5150633,943	N	5150633,945
	E	332827,744	E	332827,746	E	332827,744
	Q	1654,324	Q	1654,323	Q	1654,322

5.2 ANALISI VOLUMETRICA

Nella fase di elaborazione dei dati acquisiti si è proceduto dapprima alla rimozione della vegetazione presente nelle scansioni acquisite con il laser terrestre mediante una procedura di filtraggio semi-automatico implementata in RiSCANPRO. Operando sempre all'interno di questo software, la nuvola di punti risultante è stata quindi georeferita sui dati LiDAR del 2003. Allo scopo, onde migliorare la precisione di georeferenziazione ottenibile con il metodo di orientamento su punto noto descritto in precedenza, la co-registrazione tra dati TLS e LiDAR è stata rafforzata sfruttando la procedura di allineamento automatica (Multi-Station-Adjustment) implementata in RiSCANPRO e basata sull'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*). Allo scopo, data l'ampia estensione di versante rilevato con il Riegl Z620 (Fig. 7), sono state utilizzate le zone di sovrapposizione tra la nuvola di punti LiDAR e quella TLS, esterne al corpo di frana principale. Il risultato di questa operazione è mostrato in figura 8, nella quale la nuvola di punti acquisita con il TLS e texturizzata con le immagini della fotocamera digitale Nikon D200, appare correttamente sovrapposta ai dati LiDAR. Successivamente, i DTM ottenuti a partire dalle misure acquisite con le due strumentazioni laser (Riegl Z620 e Optech ALTM 3033) sono stati confrontati tra loro. La comparazione volumetrica ha evidenziato una mobilitazione massiccia di materiale nella parte superiore della frana (circa 221000 m³) ed una parziale deposizione nelle zone inferiori (circa 63000 m³), come mostrato nelle figure 9 e 10. I valori ottenuti sono risultati in accordo con quanto emerso nell'ambito di precedenti studi condotti nella medesima area attraverso il confronto tra DEM derivati però solamente da misure ALS (Massari et al., 2007) acquisite anche in questo caso prima e dopo l'evento franoso.

5.2.1 CONFRONTO VOLUMI DTM 2003 – TLS 2010

La fase di elaborazione dei dati è stata svolta all'interno del **software RiSCANPRO** secondo lo schema seguente:

- rimozione della vegetazione presente nelle scansioni TLS tramite filtraggio semi-automatico implementata nel software;

- georeferenziazione del DTM TLS nel SdR LiDAR, mediante attribuzione delle coordinate Gauss-Boaga ai due punti misurati con GPS-RTK e calcolo della trasformazione tra SdR laser e SdR Roma40;

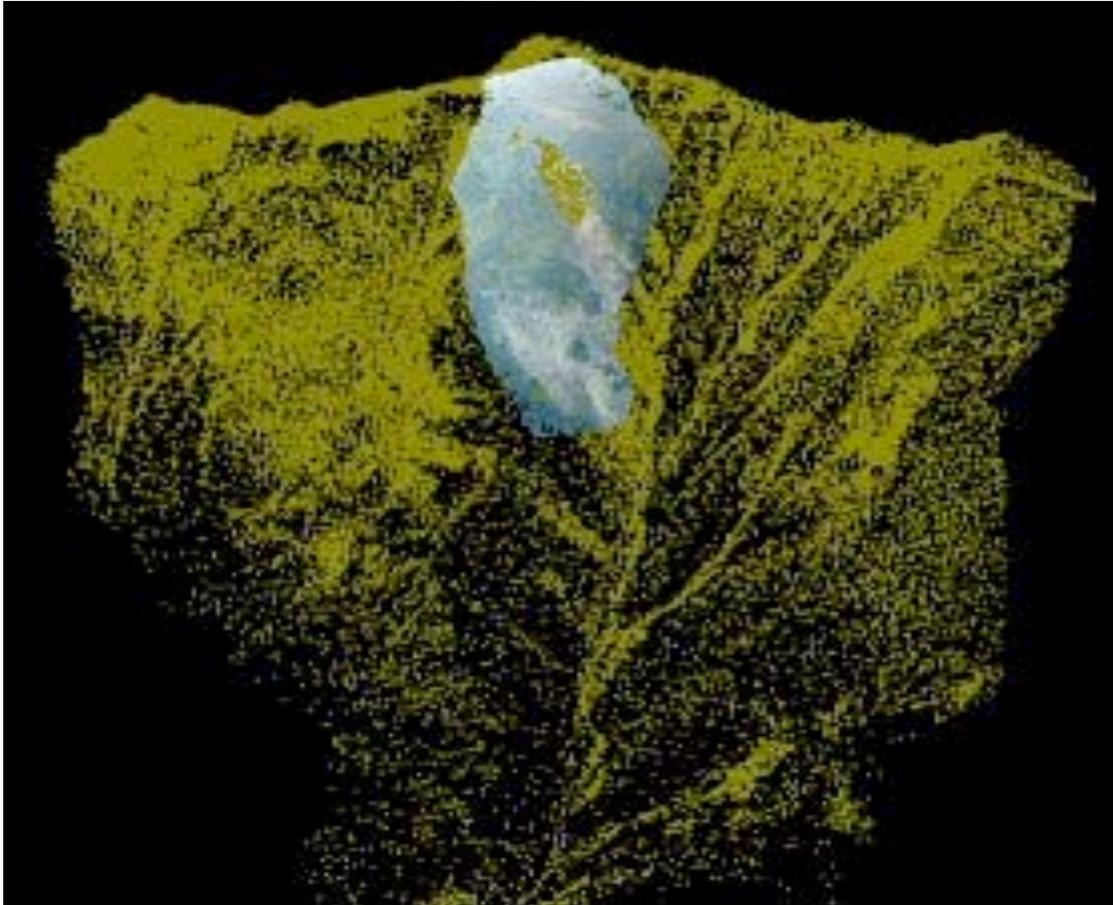


Figura 5.3: Dati laser scanner terrestre (in azzurro) sovrapposti alla nuvola di punti LiDAR del 2003 (in verde).

- raffinamento della georeferenziazione attraverso la procedura di allineamento automatica MSA (Multi-Station-Adjustment) basata sull'algoritmo ICP (Iterative Closest Point);

- comparazione volumetrica tra i due DTM derivati dalle misure TLS e ALS.

Sono state utilizzate le zone di sovrapposizione tra la nuvola di punti LiDAR (verde), dal DTM LiDAR del 2003 e quella TLS (azzurro), esterne al corpo di frana principale il tutto visibile nella figura 5.4.

Il risultato di questa operazione consiste nel fatto che la nuvola di punti acquisita con il TLS e texturizzata con le immagini della fotocamera digitale Nikon D90, appare correttamente sovrapposta ai dati LiDAR.

Il confronto tra i due DTM (Vedi Figura 5.3) ha evidenziato una mobilitazione massiccia di materiale:

nella parte superiore della frana (221000 m³)

ed una parziale deposizione:

nelle zone inferiori (63000 m³)

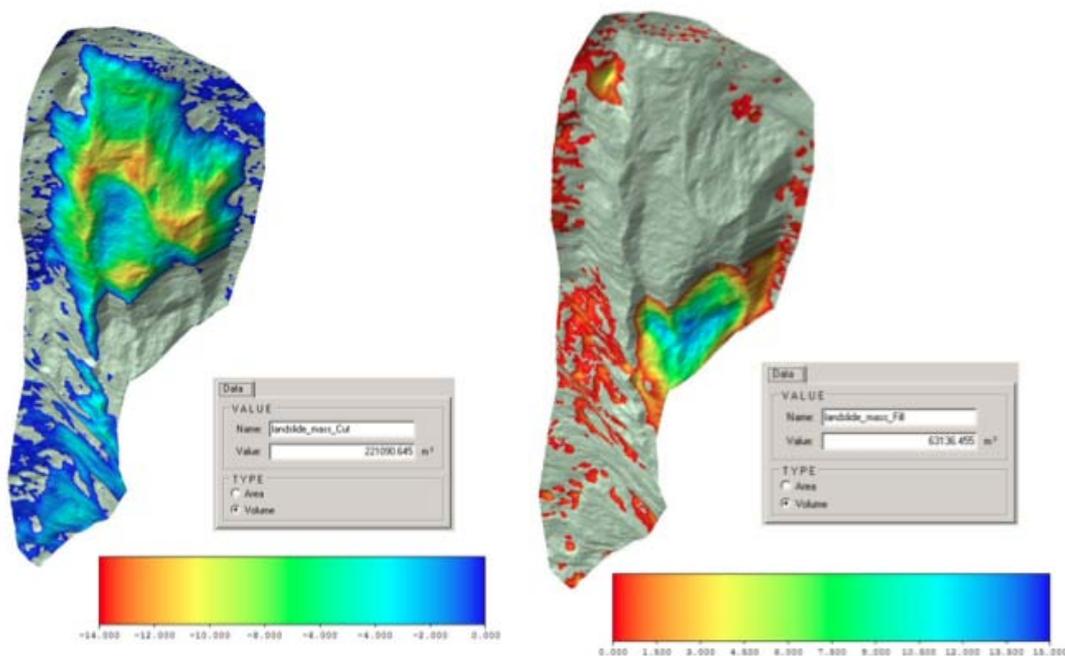


Figura 5.4: Volume di materiale detritico smobilitato alla sommità della frana.

Figura 5.5: Volume di materiale detritico depositato alla base della frana.

I valori ottenuti sono risultati in accordo con quanto emerso nell'ambito di precedenti studi condotti nella medesima area attraverso il confronto tra DTM derivati però solamente da misure ALS acquisite anche in questo caso prima e dopo l'evento franoso.

I risultati ottenuti da queste applicazioni evidenziano le enormi potenzialità dell'utilizzo della tecnologia laser-scanner terrestre per la restituzione di modelli tridimensionali utili al monitoraggio dei pendii soggetti a dissesti idrogeologici.

Il lavoro svolto dimostra che attraverso **l'integrazione** di rilievi LiDAR aerei con misure da laser scanner terrestre è possibile:

- produrre DTM di qualità e dettaglio superiori, benchè su aree più ristrette, migliorando localmente le capacità di analisi e modellazione di eventi franosi rispetto a quanto ottenibile con sole misure ALS,
- operare in zone impervie o di difficile accesso, acquisendo dati anche in quelle zone dove la morfologia del luogo può impedire un rilievo completo del territorio tramite laser aereo.

Ultima analisi della frana consiste nel monitorare e valutare l'arretramento della frana sul lato destro della corona; mentre si vede chiaramente come sia rimasta inalterata l'area potenzialmente instabile a monte del sentiero e immediatamente a valle di questo.



Figura 5.6: 2008



Figura 5.7: 2010

5.2.1 CONFRONTO VOLUMI DTM 2003 – TLS 2008

Analogamente alla metodologia utilizzata al paragrafo precedente si procede all'analisi dei volumi tra DTM da LIDAR 2003 e da dati TLS provenienti dalla campagna di rilievo del 2008:

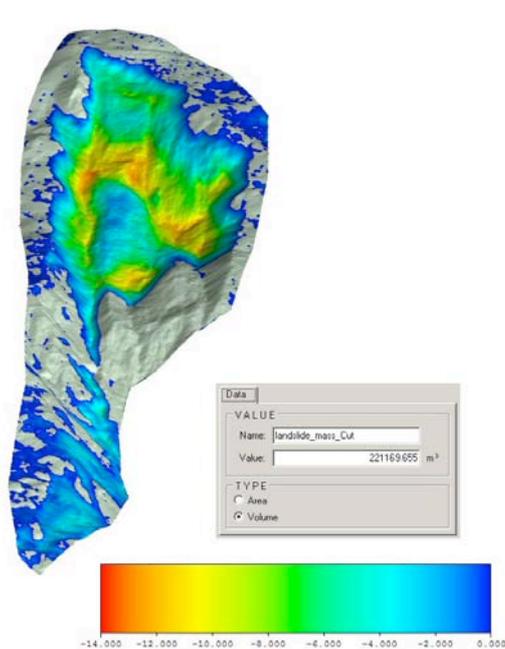


Figura 5.8: Volume di materiale detritico smobilitato alla sommità della frana.

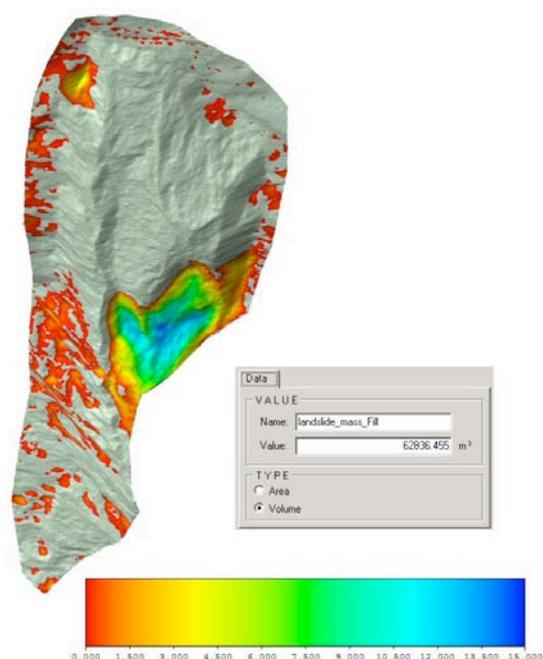


Figura 5.9: Volume di materiale detritico depositato alla base della frana.

Il confronto tra i due DTM (Vedi Figura 5.3) ha evidenziato una mobilitazione massiccia di materiale:

nella parte superiore della frana (221170 m³)

ed una parziale deposizione:

nelle zone inferiori (62831 m³)

5.2.2 CONFRONTO VOLUMI DTM 2003 – TLS 2009

Analogamente alla metodologia utilizzata al paragrafo precedente si procede all'analisi dei volumi tra DTM da LIDAR 2003 e da dati TLS provenienti dalla campagna di rilievo del 2009:

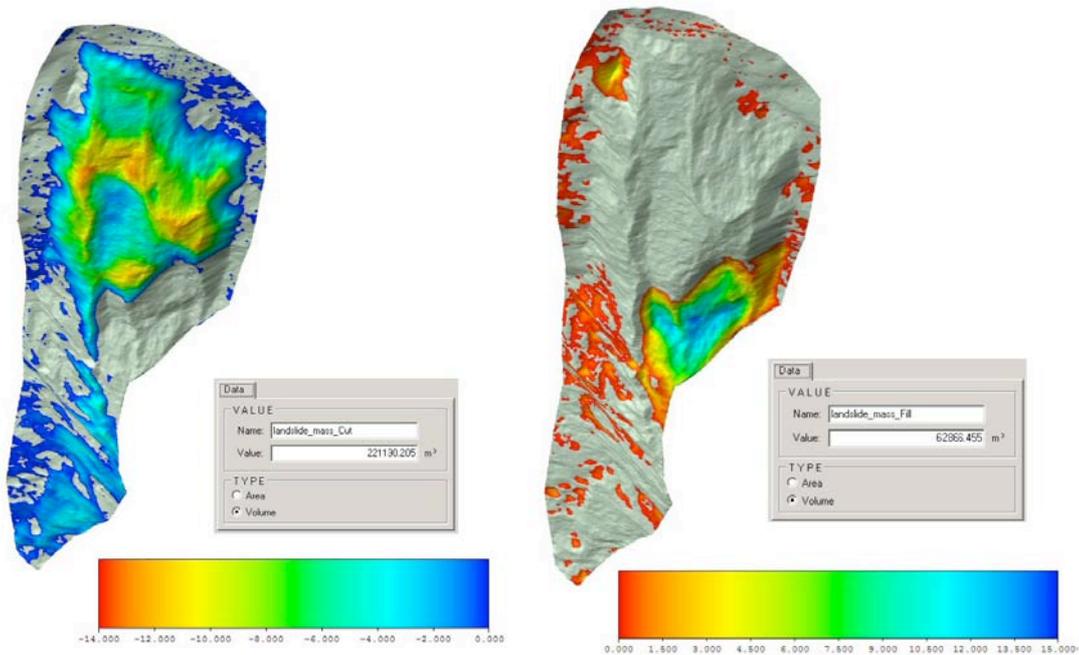


Figura 5.10: Volume di materiale detritico smobilizzato alla sommità della frana.

Figura 5.11: Volume di materiale detritico depositato alla base della frana.

Il confronto tra i due DTM (Vedi Figura 5.3) ha evidenziato una mobilitazione massiccia di materiale:

nella parte superiore della frana (221130 m³)

ed una parziale deposizione:

nelle zone inferiori (62870 m³)

CAPITOLO 6.
CONCLUSIONI

6.1 CONCLUSIONI

I risultati ottenuti da queste applicazioni evidenziano le enormi potenzialità dell'utilizzo della tecnologia laser-scanner terrestre per la restituzione di modelli tridimensionali utili al monitoraggio dei pendii soggetti a dissesti idro-geologici. Il lavoro svolto dimostra che attraverso l'integrazione di rilievi LiDAR aerei con misure da laser scanner terrestre è possibile: i) produrre DTM di qualità e dettaglio superiori, benchè su aree più ristrette, migliorando localmente le capacità di analisi e modellazione di eventi franosi rispetto a quanto ottenibile con sole misure ALS, ii) operare in zone impervie o di difficile accesso, acquisendo dati anche in quelle zone dove la morfologia del luogo può impedire un rilievo completo del territorio tramite laser aereo.

La valutazione del laser scanner terrestre come strumento per il monitoraggio e l'analisi degli eventi franosi che interessano il bacino del Miozza non si esaurisce con il lavoro presentato. Si ritiene infatti necessario approfondire in particolare due argomenti: il confronto tra lo studio di bacini montani sulla base di soli dati LiDAR o TLS e la quantificazione dei movimenti franosi attraverso rilievi TLS multitemporali.

CAPITOLO 7.
BIBLIOGRAFIA

A. GUARNIERI, N. MILAN, A. VETTORE 2008 "Combined techniques for the stability control of historical structures" Proc. of 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis / 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering - Lisbona, Portogallo, 12-15 Maggio

V. DAL PIAZ, A. GUARNIERI, N. MILAN, A. VETTORE - TECNICHE DI MISURA INTEGRATE PER IL RILEVAMENTO ED IL CONTROLLO DI STABILITA' DI UNA STRUTTURA STORICA LIGNEA - Conservare e restaurare il legno - Bressanone (BZ), 22-24 Giugno 2009.

A. GUARNIERI, N. MILAN, A. VETTORE - CONTROLLO DI STABILITA' DI UNA STRUTTURA CICLOPEDONALE - ASITA 2009 - Bari - Fiera del Levante, 01-04 Dicembre 2009

A. GUARNIERI, N. MILAN, A. VETTORE - INTEGRAZIONE DI DATI ALS E TLS PER LA PRODUZIONE IN ZONE ALPINE - ASITA 2009 - Bari - Fiera del Levante, 01-04 Dicembre 2009

Martina Camarda, Alberto Guarnieri, Nicola Milan, Antonio Vettore - DEVELOPMENT OF UNMANNED AERIAL VEHICLE AT PADOVA UNIVERSITY - 16-18 giugno 2010 – ISPRS Commission I Calgary (CA)

Martina Camarda, Alberto Guarnieri, Nicola Milan, Antonio Vettore - MONITORING OF COMPLEX STRUCTURE FOR STRUCTURAL CONTROL USING TLS AND PHOTOGRAMMETRY: THE OLYMPIC THEATRE - 22-24 giugno 2010 – ISPRS Commission V Newcastle (UK)

Ugo Coppa, Alberto Guarnieri, Nicola Milan, Antonio Vettore - SVILUPPO DI UN SISTEMA UAV A BASSO COSTO PER IL MONITORAGGIO DEL TERRITORIO - 9-12 novembre 2010 – ASITA Brescia

Alberto Guarnieri, Nicola Milan, Antonio Vettore, Paolo Tarolli - A PROTOTYPE OF LANDSLIDE OBSERVATORY IN THE EASTERN ITALIAN ALPS - 19-23 settembre 2011 – Geitalia 2011 Torino

Luca Carturan, Simone Calligaro, Alberto Guarnieri, Nicola Milan, Paolo Tarolli, Daniele Moro, Giovanni Baldassi, Alberto Carton, Federico Cazorzi, Antonio Vettore, Giancarlo Dalla Fontana - Terrestrial Laser Scanner survey of two small glacial formations in the Eastern Italian Alps - 3-8 aprile 2011 – EGU 2011 Wien

Luca Carturan, Simone Calligaro, Alberto Guarnieri, Nicola Milan, Paolo Tarolli, Daniele Moro, Giovanni Baldassi, Alberto Carton, Federico Cazorzi, Antonio Vettore, Giancarlo Dalla Fontana - Recenti indagini geofisiche, geomorfologiche e geodetiche sul ghiacciaio Occidentale del Montasio (Alpi Giulie Italia) - 3-8 aprile 2011 – EGU 2011 Wien

M. G. Angelini, D. Costantino, N. Milan - 3D and 2D documentation and visualization of cultural heritage – 12-17 settembre 2011 – CIPA 2011 Praha

Paolo Paronuzzi, Daniele Gnech - Giornale di Geologia Applicata 6 (2007) 55-64, doi: 0.1474/GGA.2007-06.0-06.0179 - Frane di crollo indotte da piogge intense: la casistica del Friuli - Venezia Giulia (Italia NE)

- Tesi di laurea di Gordini Cristian: "INTEGRAZIONE DELLA TECNICA LASER SCANNING CON LA FOTOGRAFFIA DIGITALE" - Università di Bologna – Facoltà di Ingegneria – DI-START
- Tesi di laurea di Anthony M. Dubin: "Assessing the influence of digital elevation model resolution on hydrologic modeling" Università di Washington - Master of Science in Engineering
- Letteratura tecnica: "TECNICHE DI RILEVAMENTO TRIDIMENSIONALE TRAMITE LASER-SCANNER" vol. 1 - Matteo Sgrenzaroli, Giorgio Vassena – Università di Brescia
- Alba M., Giussani A., Roncoroni F., Scaioni M. - ANALISI DELLE PRECISIONI OTTENIBILI NELLA DETERMINAZIONE DI PUNTI CON LASER SCANNING TERRESTRE UTILIZZANDO LA GEOREFERENZIAZIONE DIRETTA
- Massari G., Paganini, P., Potleca M., Torresin M.T. - CONTROLLO DEI DISSESTI SU UN BACINO MONTANO TRAMITE ANALISI MULTITEMPORALE
- Tarolli P., Dalla Fontana - G.HIGH RESOLUTION LIDAR-DERIVED DTMS:SOME APPLICATIONS FOR THE ANALYSIS OF THE HEADWATER BASINS MORPHOLOGY
- Gethin Roberts , Xiaolin Meng , Michele Meo , Alan Dodson, Emily Cosser , Emanuela Iuliano, Alan Morris: A REMOTE BRIDGE HEALTH MONITORING SYSTEM USING COMPUTATIONAL SIMULATION AND GPS SENSOR DATA - Università Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy (IESSG); University of Nottingham, NG7 2RD, UK; College of Aeronautics, Cranfield University, MK43 0AL, UK.
- Xiaoling Meng: REAL-TIME DEFORMATION MONITORING OF BRIDGES USING GPS/ACCELEROMETER - Università di Nottingham, UK.
- Anthony M. Dubin - Assessing the influence of digital elevation model resolution on hydrologic modelling - University of Washington
- CNR Torino - IL MONITORAGGIO DI CORSI D'ACQUA E FENOMENI FRANOSI: UTILIZZO INTEGRATO DI TECNICHE A SCANSIONE LASER E POSIZIONAMENTO GEODETICO - CNR Gruppo Monitoraggio – Torino
- A. Squarzoni, A. Calgaro, G. Teza, R. Genevois + altri - INTEGRAZIONE LASER SCANNER E METODI GEOFISICI NELLO STUDIO DELLA FRANA DI PERAROLO DI CADORE - Dip. Geologia, Paleontologia e Geofisica - Università di Padova
- A. Squarzoni, A. Calgaro, G. Teza, R. Genevois + altri - MONITORAGGIO DI EVENTI FRANOSI IN ROCCIA CON TECNICHE LASER-SCANNER: Dip. Ingegneria Territorio, Ambiente, Geotecnologie - Università di Torino
- Fraser, C.S. & Riedel, B., 2000. Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology Journal of Photogrammetry and remote Sensing, 55, 268-76.
- F. Remondino, C. Fraser , 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons ISPRS Commission V Symposium, Dresden 2006.
- Beraldin J.-A., 2004. Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry - The Last Decade and Beyond. Proc. of XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey.
- 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.

- El-Hakim S., Beraldin A., Picard M., 2002. Detailed 3D reconstruction of monuments using multiple techniques. In ISPRS/CIPA International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, Greece, pp.58-64.
- Guarnieri A., Remondino F., Vettore A., 2004. Photogrammetry and Ground-based Laser Scanning: Assessment of Metric Accuracy of the 3D Model of Pozzoveggiani Church. Proc. of FIG Working week 2004, "The Olympic Spirit in Surveying", Athens, Greece.
- Guarnieri A., Vettore A., El-Hakim S., Gonzo L., 2004. Digital photogrammetry and laser scanning in cultural heritage survey. Proc. of XXth ISPRS Congress "Geo-Imagery Bridging Continents, Istanbul, Turkey.
- Guarnieri A., Remondino F., Vettore A. (2006). "Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to Cultural Heritage 3D modeling". In Proc. of ISPRS Comm. V Symposium "Image Engineering and Vision Metrology", Dresden, Germany.
- Guarnieri A., Milan N., Vettore A., 2008. Combined techniques for the stability control of historical structures. 13th FIG International Symposium on deformation measurement and Analysis, Lisboa, Portugal.
- Remondino F., Guarnieri A., Vettore A., 2005. 3D modeling of close-range objects: Photogrammetry or Laser Scanning ? Proc. Of IS&T/SPIE 17th Annual Symposium, Electronic Imaging, San José, California.
- Valzano V., Bandiera A., Beraldin J.-A., Picard M., El-Hakim S., Godin G., Paquet E., Rioux M., 2005. Fusion of 3D Information for Efficient Modeling of Cultural Heritage Sites with Objects. In CIPA 2005 XXth International Symposium: Cooperation to Save the World's Cultural Heritage, Torino, Italy.
- Vozikis G., Haring A., Evangelos Vozikis E., Kraus K., 2004. Laser Scanning: A New Method for Recording and Documentation in Archaeology. Proc. of FIG Working week 2004, "The Olympic Spirit in Surveying", Athens, Greece.
- Cappello F., Mancuso A., 2004. Curve and Surface Fitting via Optimisation Technique. CAD'04 International CAD Conference and Exhibition.
- Capra A., Costantino D., Rossi G., Angelini M. G., Leserri M., 2005. Survey and 3D modelling of Castel del Monte. The CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, vol. XX:183-188.
- Costantino D., Capra A., Angelini M. G., 2005. "Virtual reconstruction of damaged decorative elements. Workshop Italy-Canada 2005 - 3D Digital Imaging and Modeling: Applications of Heritage, Industry, Medicine and Land, Session S2_4.
- Costantino D., Rossi G., 2006. Castel del Monte laser scanner survey. XI International Seminar FORUM UNESCO - University and Heritage.
- Software guide: Photomodeler ver. 5.0 - www.photomodeler.com
- Software guide: Photomodeler ver. 6.0 - www.photomodeler.com
- Software guide: CYCLONE 5.3 quick manual www.leycageosystem.com

Software guide: Raindrop Geomagic, <http://www.raindrop.com>

Software guide: Strauss, <http://www.hsh.info>.

Software guide: i-Witness, <http://www.photometrix.com.au>

Alba M., Giussani A., Roncoroni F., Scaioni M. (2005). "Analisi delle precisioni ottenibili nella determinazione di punti con laser scanning terrestre utilizzando la georeferenziazione diretta".

Massari, G., Paganini, P., Potleca, M., Torresin, M.T. (2007). "Controllo dei dissesti su un bacino montano tramite analisi multitemporale, Decima Conferenza Italiana Utenti Esri, Roma.

Tarolli, P., Dalla Fontana, G. (2008). "High resolution LiDAR-derived DTMs: some applications for the analysis of the headwater basins' morphology", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (5/C55), 297-306, ISSN: 1682-1777.

Tarolli, P., Tarboton, D.G. (2006). "A New Method for Determination of Most Likely Landslide Initiation Points and the Evaluation of Digital Terrain Model Scale in Terrain Stability Mapping", Hydrol. Earth Syst. Sci., 10, 663-677, ISSN: 1027-5606.

Guarnieri A., Vettore A. (2006). "Tecniche di registrazione", Atti del seminario "Sistemi a scansione per l'Architettura e il Territorio" Firenze, Alinea Editrice, ISBN: 978-88-6055-119-1.

Gethin Roberts , Xiaolin Meng , Michele Meo , Alan Dodson, Emily Cosser , Emanuela Iuliano, Alan Morris:

A REMOTE BRIDGE HEALTH MONITORING SYSTEM USING COMPUTATIONAL SIMULATION AND GPS SENSOR DATA

Università Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy (IESSG); University of Nottingham, NG7 2RD, UK; College of Aeronautics, Cranfield University, MK43 0AL, UK.

Xiaoling Meng:

REAL-TIME DEFORMATION MONITORING OF BRIDGES USING GPS/ACCELEROMETER
Università di Nottingham, UK.

Anthony M. Dubin:

ASSESSING THE INFLUENCE OF DIGITAL ELEVATION MODEL RESOLUTION ON HYDROLOGIC MODELING
University of Washington

CNR Torino:

IL MONITORAGGIO DI CORSI D'ACQUA E FENOMENI FRANOSI: UTILIZZO INTEGRATO DI TECNICHE A SCANSIONE LASER E POSIZIONAMENTO GEODETICO
CNR Gruppo Monitoraggio - Torino

A. Squarzoni, A. Calgaro, G. Teza, R. Genevois + altri:

INTEGRAZIONE LASER SCANNER E METODI GEOFISICI NELLO STUDIO DELLA FRANA DI PERAROLO DI CADORE
Dip. Geologia, Paleontologia e Geofisica - Università di Padova

A. Squarzoni, A. Calgaro, G. Teza, R. Genevois + altri:

MONITORAGGIO DI EVENTI FRANOSI IN ROCCIA CON TECNICHE LASER-SCANNER
Dip. Ingegneria Territorio, Ambiente, Geotecnologie - Università di Torino

V. DAL PIAZ, A. GUARNIERI, N. MILAN, A. VETTORE

TECNICHE DI MISURA INTEGRATE PER IL RILEVAMENTO ED IL CONTROLLO DI STABILITA' DI UNA STRUTTURA STORICA LIGNEA

Conservare e restaurare il legno
Bressanone (BZ), 22-24 Giugno 2009

A. GUARNIERI, N. MILAN, A. VETTORE
CONTROLLO DI STABILITA' DI UNA STRUTTURA CICLOPEDONALE
ASITA 2009
Bari - Fiera del Levante, 01-04 Dicembre 2009

A. GUARNIERI, N. MILAN, A. VETTORE
INTEGRAZIONE DI DATI ALS E TLS PER LA PRODUZIONE IN ZONE ALPINE
ASITA 2009
Bari - Fiera del Levante, 01-04 Dicembre 2009

16-18 giugno 2010 – ISPRS Commission I Calgary (CA)
DEVELOPMENT OF UNMANNED AERIAL VEHICLE AT PADOVA UNIVERSITY
Martina Camarda, Alberto Guarnieri, Nicola Milan, Antonio Vettore

22-24 giugno 2010 – ISPRS Commission V Newcastle (UK)
MONITORING OF COMPLEX STRUCTURE FOR STRUCTURAL CONTROL USING TLS AND
PHOTOGRAMMETRY: THE OLYMPIC THEATRE
Martina Camarda, Alberto Guarnieri, Nicola Milan, Antonio Vettore

9-12 novembre 2010 – ASITA Brescia
SVILUPPO DI UN SISTEMA UAV A BASSO COSTO PER IL MONITORAGGIO DEL TERRI-
TORIO
Ugo Coppa, Alberto Guarnieri, Nicola Milan, Antonio Vettore

INDICE.

CAPITOLO	1	ABSTRACT – SOMMARIO	Pag	1
CAPITOLO	2	INTRODUZIONE: PROBLEMATICHE, OBIETTIVI DELLA TESI E STRUTTURAZIONE DEI CAPITOLI SEGUENTI	Pag	5
CAPITOLO	3	STATO DELL'ARTE RELATIVO ALLA PROBLEMATICHE TRATTATA: USO DI TLS E LIDAR PER MONITORAGGIO AMBIENTALE, IN PARTICOLARE FRANE	Pag	15
CAPITOLO	4	MATERIALI E METODI	Pag	61
CAPITOLO	5	SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI	Pag	95
CAPITOLO	6	CONCLUSIONI	Pag	109
CAPITOLO	7	BIBLIOGRAFIA	Pag	111
INDICE			Pag	117