



Internationales Symposion INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

PROPOSTA PER L'APPLICAZIONE DI METODOLOGIE LASER SCANNER (DA TERRA E CON RIPRESA AEREA) PER IL MONITORAGGIO DI FENOMENI FRANOSI: LA FRANA DEL PASSO DELLA MORTE

PROPOSAL FOR LASER SCANNER TECHNOLOGY APPLICATION (TERRESTRIAL-BASED AND AIRBORNE) FOR LANDSLIDE MONITORING: "PASSO DELLA MORTE" LANDSLIDE

Marco Bacchini¹, Fabio Giuriato¹ e Massimo Maso¹

RIASSUNTO

La frana del Passo della Morte (bacino del Tagliamento) interessa la S.S. n.52 in corrispondenza di una galleria. Questo dissesto di notevoli dimensioni potrebbe comportare un rischio elevato in caso di collasso del versante. Una maggiore conoscenza ed il monitoraggio di questo fenomeno franoso sono molto importanti per l'Autorità di Bacino per la predisposizione del Piano per l'Assetto Idrogeologico. I rilievi laser scanner (con ripresa aerea e da postazione fissa a terra) integrano i monitoraggi, superficiali e profondi, ad oggi esistenti. Il confronto di dati rilevati in successive riprese potrebbe confermare gli spostamenti già diversamente identificati e fornire indicazioni circa la dinamica evolutiva. Le esperienze condotte dall'Autorità di Bacino dimostrano come la tecnologia laser scanner consenta di generare DTM di alta qualità. I modelli di simulazione 3D derivati (corretti per il geoide locale) hanno elevata precisione planaltimetrica. Sono pertanto maggiori le possibilità di analisi sulle superfici indagate per derivare misure quantitative reali degli indicatori fisiografici dell'area d'indagine. Questo lavoro illustra le conoscenze raggiunte evidenziando una proposta per l'utilizzo di queste nuove tecnologie per lo studio dei dissesti.

Parole chiave: frana, laser scanner, monitoraggio

ABSTRACT

The "Passo della Morte" tunnel on the National Road n.52 is threatened by a huge landslide (Tagliamento river basin), which represents a high hazard for people. A detailed knowledge and monitoring of the phenomenon are useful for Autorità di Bacino to develop a "Piano per l'Assetto Idrogeologico" (a plan for hydrogeological risk assessment). Laser scanner surveys (airborne and terrestrial-based ones) integrate the existing monitoring system, (GPS, topography, TDR, boreholes, inclinometers). The comparison with the data collected during

¹ Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave e Brenta-Bacchiglione, Dorsoduro 3593, 30123 Venezia, Italia (Tel.: +39-41-714444; Fax: +39-41-714313; email: at_geologia@adbve.it, sistema.informativo@adbve.it)

consecutive surveys could validate the displacement registered with other monitoring instruments and furnish some information about landslide evolution.

Previous experience made by Autorità di Bacino demonstrate that laser scanner technologies allow us to create high quality Digital Terrain Model. 3D model (corrected with data of local geode) have high resolution in altimetry and planimetry. In this way it is possible to analyse ground shape collecting “real” data of physiographic indicators. This paper focus on a proposal for laser scanner technologies application for landslide monitoring.

Key words: landslide, laser scanner, monitoring system

INTRODUZIONE

L’Autorità di Bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave e Brenta-Bacchiglione (n.d.r. di seguito denominata Autorità di Bacino), nell’ambito delle proprie attività istituzionali, ha recentemente predisposto, ed è in via di adozione, il Progetto di Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico (P.A.I.) (L.365/2000, L.267/1998, D.P.C.M. del 29.09.1998).

Questo Progetto di Piano costituisce di fatto uno stralcio dei Piani di Bacino dei vari fiumi di competenza, così come stabilito dall’art.17 della L.183/89 e dalle sue successive modificazioni e/o integrazioni, e pertanto concorre alla definizione di una corretta gestione del territorio in seno a specifiche tematiche (dissesto idrogeologico) alla scala dell’intero bacino idrografico.

Per la predisposizione del Progetto di Piano sono state svolte attività di studio finalizzate all’individuazione e perimetrazione delle aree a pericolosità/rischio idrogeologico e alla valutazione dei necessari interventi di mitigazione.

Tra le altre attività conoscitive intraprese si annoverano alcune campagne di rilievi con tecnologia laser scanner su tutto il territorio di competenza dell’Autorità di Bacino che nel corso degli anni hanno permesso di acquisire competenza ed esperienza in merito. Lo sviluppo di tali studi ha condotto altresì all’applicazione di tale metodologia, sia con rilievo aereo sia con rilievo da postazione fissa a terra, su specifici siti soggetti a fenomeni di dissesto.

La frana del Passo della Morte (Fig.1) rappresenta un caso specifico di studio di notevole importanza ai fini della pianificazione territoriale, viste le sue ingenti dimensioni, viste le recenti attivazioni che hanno causato cedimenti sia della galleria sia della sede stradale e considerata la possibile ostruzione del Fiume Tagliamento in caso di collasso del versante.

In questo sito è stato possibile l’installazione di una rete di monitoraggio del fenomeno d’instabilità a seguito di un Protocollo d’Intesa stipulato fra Autorità di Bacino e Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia – Direzione Regionale della Protezione Civile, col quale si individuava la necessità di studi geologici-geomorfologici e monitoraggi per la caratterizzazione del rischio da frana, con la collaborazione tecnico-scientifica del CNR-IRPI di Padova.

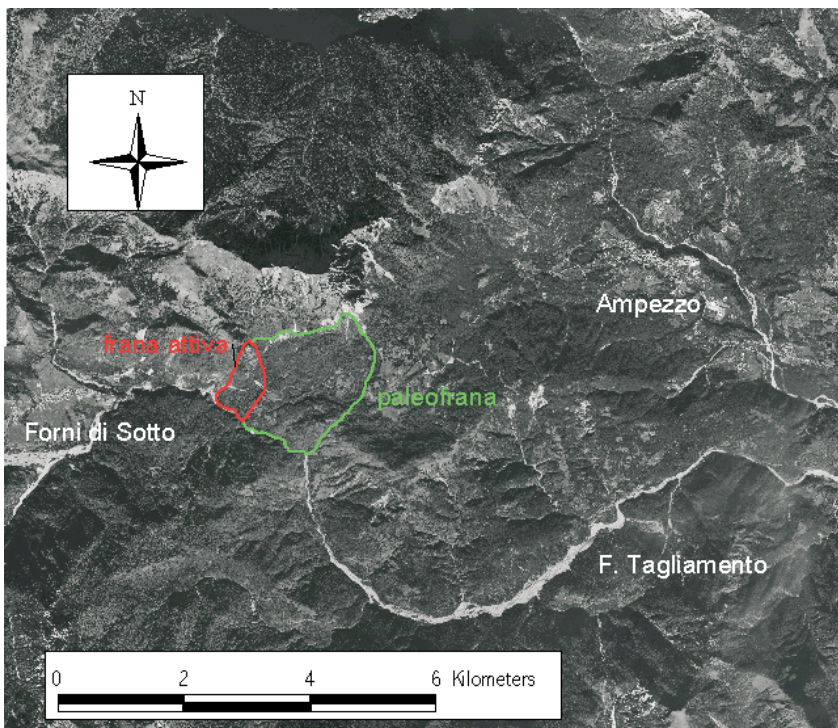


Fig1: Perimetrazione delle aree instabili nella zona del Passo della Morte (fonte CNR-IRPI Padova)

Fig1: Landslide boundary in Passo della Morte area (picture from CNR-IRPI Padova)

Inquadramento generale dell'area, ubicata in comune di Forni di Sotto (UD), su ortofoto con perimetrazione dell'area attiva di dissesto e della più estesa area di paleofrana. Dall'immagine è visibile come il dissesto insista sull'alveo del fiume Tagliamento.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO

L'area di studio è ubicata in sinistra idrografica del fiume Tagliamento, su un versante acclive ($10^\circ \div 40^\circ$) che si sviluppa da quota 1200 m.s.l.m sino al fondovalle che in questo punto tocca i 600 m.s.l.m. circa. Da un'analisi del territorio effettuata con foto aeree si individuano due distinte aree di frana con diverso grado di attività (Fig.1). L'area attiva più occidentale ha una superficie circa di 530.000 m² (stima del volume in dissesto di circa 15 milioni m³) mentre la più estesa area di paleofrana copre una superficie pari a 2.850.000 m².

La stima strumentale dei movimenti in atto si attesta intorno ai 5 cm/anno come valore medio, i cui effetti sono le deformazioni visibili sia nella volta della galleria sia sulla sede stradale.

L'ammasso detritico-roccioso (Dolomia dello Schlern e argille siltose varicolori) in movimento è il prodotto del distacco di un ingente massa dalla parete rocciosa retrostante ed attualmente scorre lungo una superficie di scivolamento verso le quote inferiori del fondovalle.

La zona di studio rientra in un settore delle Alpi e Prealpi Carniche caratterizzato da scaglie tettoniche ad andamento generale E-W, vergenti a sud, frutto della deformazione subita in età

neogenica. Il lineamento principale della zona è la linea di Sauris, un sovrascorrimento ad angolo molto basso che porta i terreni compresi fra lo Scitico ed il Carnico inferiore a sovrascorrere su quelli del Carnico superiore (argille siltose varicolori e gessi).

Nel territorio indagato sono stati rilevati terreni affioranti che si estendono dalla piattaforma della Dolomia dello Schlern e la Dolomia di Forni cui si sovrimpongono depositi quaternari quali alluvioni, conglomerati, morene, depositi di frana e depositi di versante. La successione comprende i termini di seguito riportati:

- *Dolomia dello Schlern* (Ladinico sup.): calcari o calcari dolomitici massicci o in grossi banchi;
- *Calcari scuri stratificati* (Carnico): caratterizzata da calcari micritici, e subordinate calcareniti, in strati di spessore variabile da 10 cm al metro, alternati a livelli marnosi scuri che possono raggiungere i 25 cm di spessore;
- *Calcari e dolomie stratificati* (Carnico): un'alternanza di calcari, calcareniti e dolomie con sottili intercalazioni marnose grigie;
- *Dolomie cristalline massicce* (Carnico): dolareniti compatte di colore grigio chiaro;
- *Argille siltose varicolori* (Carnico): prevalentemente argille siltose e siltiti dal color rossastro a cui si intercalano strati arenacei con spessore variabile fino al metro, dolomie marnose grigio biancastre in strati di 5-10 cm;
- *Gessi* (Carnico sup.): caratterizzati dalla presenza di impurità argillose sparse uniformemente nella roccia o in veli centimetrici scuri;
- *Dolomie cariate* (Carnico sup.): dolomie marnose grigie, dolomie chiare spesso vacuolari in strati più spessi, e marne dolomitiche. Sono frequenti breccie di collasso formate da clasti spigolosi centimetrici di dolomie grigio-giallastre analoghe a quelle che costituiscono gli strati sopra e sottostanti, immersi in una matrice marnosa chiara;
- *Dolomia di Forni* (Norico): dolomie, dolomie marnose scure in strati decimetrici, selcifere, talvolta laminate, alternate a livelli marnosi ricchi di sostanza organica.

I dati sopra riportati sono estratti dalla relazione del CNR-IRPI (sezione di Padova) redatta nell'ambito di quanto previsto nel Protocollo d'Intesa fra Autorità di Bacino e Direzione della Protezione Civile del Friuli Venezia Giulia.

Una analisi geomorfologica preliminare è stata fatta, in un precedente lavoro (Massari et al., 2003), sulla base della prima scansione laser effettuata. In tale studio si individuano l'idrografia superficiale, i lineamenti strutturali e gli elementi morfologici a partire dal rilievo delle ombre (*shadow relief*), dalla carta delle pendenze (*terrain slope*) e dalla carta dell'esposizione dei versanti (*aspect*). L'analisi condotta ha evidenziato la possibilità di tracciare il reticolo dell'idrografia superficiale e delle lineazioni tettoniche con una buona qualità del dato, che necessariamente deve sempre essere affiancato dal rilevamento di campagna; le geometrie del territorio esaltate dalla visualizzazione dei dati in modalità *shaded relief* e *terrain slope* hanno consentito di individuare le morfologie interpretandone i rapporti spazio-temporali. Sono stati riconosciuti quattro settori a grande scala con diversa morfogenesi e in particolare, nel macrosettore della zona di deformazione del versante, può essere suddiviso nei due distinti stadi evolutivi del fianco vallivo (frana attiva e paleofrana). Nell'ambito della frana attiva si possono altresì distinguere ulteriori fasi della genesi del corpo si frana.

SISTEMA DI MONITORAGGIO

L'obiettivo di questo lavoro è quello di fornire indicazioni di dettaglio circa la predisposizione di un sistema di monitoraggio realizzato con metodologie laser scanner individuandone i requisiti necessari. La necessità è quella di realizzare un sistema che integri il laser scanner da ripresa aerea con quello effettuato da postazione fissa da terra, in un'ottica che prevede una successione di campagne di misura a scadenze regolari tali da consentire una

stima dei movimenti che caratterizzano il corpo di frana.

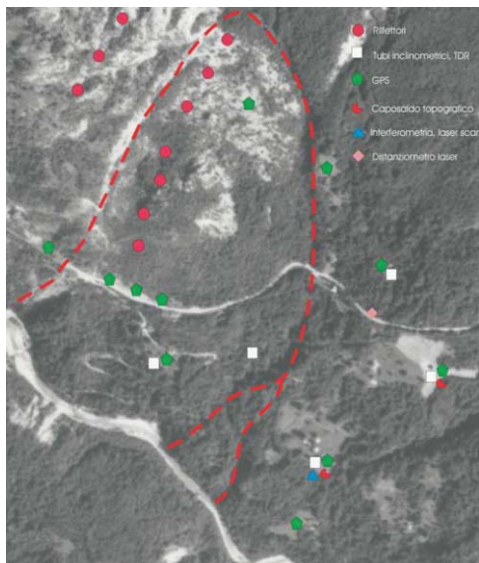


Fig2: Rete di monitoraggio prevista ed esistente nella zona della frana attiva (fonte CNR-IRPI Padova)

Fig2: Monitoring system installed in the active part of the landslide (picture from CNR-IRPI Padova)

Inquadramento generale del sistema di monitoraggio installato o in fase di realizzazione nell'area di frana attiva. Verrà altresì integrato con fori di sondaggio attrezzati con piezometri a registrazione in continuo.

Caratteristica peculiare del sito di studio è il fatto che le metodologie laser scanner vanno ad integrare un rete di monitoraggio ben diversificata in termini tipologici. Si viene così a costituire un complesso sistema d'indagine e acquisizione di dati che necessita per

forza di protocolli rigorosi per la sua impostazione.

In fig.2 si illustra l'insieme del sistema di monitoraggio al quale andranno aggiunti ulteriori fori di sondaggio strumentati con piezometri a registrazione continua su datalogger.

In dettaglio il sistema consta, oltre a quanto già installato dall'ANAS per il controllo dello stato della galleria e del suo intorno, di inclinometri, cavi estensimetrici e TDR per le misure degli spostamenti profondi; per le misure degli spostamenti superficiali si utilizzano topografia tradizionale, GPS, distanziometro laser, interferometria da terra e laser scanner da postazione fissa.

In corrispondenza della località scelta come postazione fissa da terra sono stati installati, da parte della Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, un pluviometro e un termometro per l'acquisizione dei dati meteorologici.

I rilievi laser scanner effettuati con ripresa aerea vanno a completare questo insieme di dispositivi consentendo, in primis, di disporre di un DTM di dettaglio dell'area e soprattutto, in una prospettiva di prossima realizzazione, di ricavare i vettori spostamento per ogni singolo punto dell'area rilevata individuandone pertanto il comportamento spazio-temporale.

OPERAZIONI DI INQUADRAMENTO GEODETICO DELL' AREA OGGETTO DEI RILIEVI

Partendo dal principio che i dati acquisiti dalle campagne di rilievo che utilizzano dispositivi laser scanner (terrestri o elitransportati) ed i conseguenti prodotti realizzati vengono utilizzati per indagini di pianificazione territoriale, essi per definizione devono avere caratteristiche di

precisione tali da poter descrivere dettagliatamente e in modo rigoroso, la **reale** morfologia delle regioni investigate.

Le esperienze fin qui condotte dalla Segreteria Tecnica dell' Autorità di Bacino, nel campo del telerilevamento di dati laser-aereofotogrammetrici in ambiti caratterizzati da notevoli variazioni delle caratteristiche morfologiche, dimostrano che, nell'esecuzione di questi lavori, **non** si possono ignorare le caratteristiche basilari di precisione dell'inquadramento geodetico e topografico dei siti oggetto del rilievo.

L'obiettivo è quello di raggiungere nel posizionamento un'elevata precisione planoaltimetrica, e nello stesso tempo di misurare con continuità e in un unico sistema di riferimento la posizione dei punti misurati.

È in questo contesto che risulta indispensabile la pianificazione e lo sviluppo di un preciso piano di inquadramento geotopografico che abbia la funzione di "**fulcro**" e punto di riferimento per tutti i rilievi da effettuare.

Per la realizzazione del piano di inquadramento la delimitazione dell'area oggetto del rilievo è stata eseguita utilizzando tecniche di posizionamento satellitare differenziale GPS, in modalità sia statica che RTK. In questa fase i parametri di accuratezza ritenuti sufficienti nel posizionamento geotopografico dei punti stazione GPS avevano, per la planimetria (X,Y) valori submetrici (< 20 cm) ed in quota (Z) ± 5 cm.

Allo scopo di unificare le misure in un unico Sistema di coordinate di riferimento, la determinazione delle coordinate dei vertici è avvenuta nel piano della rappresentazione di Gauss nel sistema geodetico nazionale, mentre le quote dei vertici erano geoidiche.

TRASFORMAZIONE DELLE COORDINATE GPS NEL SISTEMA DI RIFERIMENTO LOCALE

Scopo di questa fase è l'elaborazione dei valori delle coordinate GPS (WGS84) in corrispondenti valori espressi nei sistemi sopra esposti. In tale fase sono state adottate le procedure di rototraslazione che utilizzano i 7 parametri (tre traslazioni, tre rotazioni e un fattore di scala). Sono stati impiegati almeno tre punti comuni ai due sistemi. Per la determinazione del valore di coordinate nel sistema italiano Gauss-Boaga, sono stati utilizzati i parametri di rototraslazione presenti nella monografia IGM95 più vicina; precedenti dati sperimentali dimostravano una introduzione di errore massimo sulla posizione di qualche centimetro. Data l'elevata precisione richiesta dal presente lavoro, è stato raccomandato l'utilizzo di non meno di quattro o cinque punti noti nel sistema di riferimento su cui proiettare la trasformazione. Tali punti dovevano essere preliminarmente verificati per l'accertamento dell'affidabilità, e scelti come disposizione alla periferia dell'area oggetto del rilievo a formare un poligono che circoscriveva l'intera zona: calcolati i parametri, si è proceduto alle operazioni di trasformazione. Particolare cura è stata posta nel trattamento della componente altimetrica, che doveva tenere conto della differenza tra la superficie di riferimento ellissoidica delle quote GPS e la superficie di riferimento delle quote ortometriche (geoida)

RILIEVO LASER ALTIMETRICO ELITRASPORTATO

Per l'esecuzione del rilievo laser scanner elitrasportato, la pianificazione e le metodologie utilizzate sono le stesse, consolidate nella pratica della pluriennale esperienza in questo tipo di rilievi da parte della Segreteria Tecnica in questo ambito è stato utilizzato lo strumento Optech ALTM 2033 installato su di un elicottero AS350.

Lo strumento determina le coordinate tridimensionali dell'area oggetto del rilievo mediante la contemporanea interazione dei sensori che costituiscono il sistema stesso. Essenzialmente essi sono:

- il telemetro laser che misura la distanza tra la superficie misurata e l'elicottero;
- il sistema inerziale (INS), dispositivo solidale all'elicottero, che determina l'assetto rilevando i tre gradi di libertà dovuti al rollio, beccheggio e deriva;
- il GPS, che determina la posizione geografica rispetto al sistema di coordinate di riferimento

Taratura del sistema

La determinazione dell'orientamento assoluto è strettamente correlata agli errori di sistema, la gran parte dei quali è stata ridotta con le procedure di calibrazione. Un volo di taratura è stato effettuato su di una porzione di territorio di cui si conoscevano preventivamente quote e posizioni planimetriche i parametri di taratura sono stati derivati attraverso il confronto dei dati registrati ed i valori di "verità a terra".

Volo di ricognizione preventiva

Come ormai più volte constatato, durante le campagne di rilievo laser scanner le interferenze, provocate dall'alta potenza delle trasmissioni di ponti radio, radiofari militari, ecc..., possono rendere assai problematica la ricezione del segnale GPS con conseguenze che si ripercuotono direttamente sulla qualità dei dati. L'area oggetto del rilievo è stata preventivamente sorvolata, in modo da verificare l'eventuale presenza di fonti di interferenza, la data e l'ora del volo è stata scelta coerentemente con gli orari pianificati per il rilievo, e con una configurazione ottimale per la costellazione GPS.

Pianificazione delle aree di volo ed acquisizione dei dati laser

Elaborato sulle considerazioni tratte dal volo di ricognizione preventiva, si è utilizzando un piano di acquisizione con orari di registrazione in funzione alla massima disponibilità di satelliti GPS.

Le strisciate di registrazione del dato laser effettuate nell'area del Passo della Morte sono costituite da un totale di 9.300.000 punti rilevati con una densità minima di 4 punti per mq sull'intera superficie di estensione di circa 1.6 X 2 Km.

Il rilievo restituito in coordinate UTM33-WGS84 è stato elaborato con il software Terrascan.

REQUISITI E SPECIFICHE TECNICHE DEL LASER SCANNER TERRESTRE

Le tecniche utilizzate dai laser scanner terrestri per misurare gli elementi geometrici che determinano le coordinate tridimensionali, sono diverse sia rispetto agli strumenti di rilievo metrico convenzionale, sia dai sistemi laser aerotrasportati. La letteratura tecnica, inoltre, non offre una definizione univoca riferita ai strumenti di acquisizione laser scanner tridimensionali terrestri. Particolare attenzione va quindi posta, al criterio di valutazione della strumentazione da utilizzare per l'esecuzione di campagne di rilievo geotopografico.

Scelta della strumentazione

Nel contesto delle acquisizioni topografiche, per la descrizione della superficie fisica terrestre, vi è la necessità di disporre di un dispositivo, che stabilito su di una posizione fissa e operando su di una porzione della superficie oggetto del rilievo, sia in grado di acquisire le coordinate tridimensionali di punti in modo automatico, in tempo reale con elevata densità.

Fondamentalmente i laser scanner terrestri possono essere distinti in due categorie: distanziometrici e triangolatori, i primi basati sul principio della misura della distanza diretta possono essere paragonati per similitudine ad una stazione totale, i secondi possono essere considerati come particolari strumenti fotogrammetrici.

Nella pianificazione di campagne di misura, in generale, la precisione richiesta dipende dal tipo di rilievo da eseguire e dalla dimensione dell'oggetto, poiché questa può variare da pochi millimetri ad alcune centinaia di metri, la scelta della strumentazione da utilizzare (non esistendo in commercio strumenti idonei per ogni evenienza) sarà da effettuarsi su tre grandi categorie suddivise in base alla portata :piccola ,per misure di oggetti a distanza di circa 1m , media da 1m a 50 m e grande > 50 m.

Nell'ambito delle campagne di misura topografiche ed in particolare nel rilievo di corpi franosì, dove gli oggetti da misurare presentano forme irregolari con elevato numero di discontinuità e non riconducibili a superfici regolari, risulta necessario operare impiegando la massima risoluzione e la massima precisione essendo questa proporzionale alla scala nominale del rilievo. Le condizioni operative e le caratteristiche tecniche indirizzano la scelta verso strumenti distanziometrici a grande portata piuttosto che a quelli di piccola o media più indicati a nostro avviso per rilievi di carattere architettonico e urbanistico.

In questo lavoro è stato utilizzato lo strumento OPTTECH mod. ILRIS-3D con portata dichiarata dal costruttore di 800 m.

CARATTERISTICHE TECNICO-OPERATIVE

Come nel caso della pianificazione del rilievo laser scanner elitransportato anche in questo caso devono essere tenute in considerazione importanti e specifiche caratteristiche strumentali e modalità operative.

Accuratezza

E' il parametro più significativo per valutare la qualità del sistema ed indica la valutazione della qualità dei dati, ossia il grado di concordanza fra le misure effettuate e la reale dimensione dell' oggetto del rilievo misurato con criteri convenzionali.

La novità sostanziale nell'utilizzo di questi strumenti è nella gestione dei dati, che rilevati in automaticamente sono molto elevati come numero ma possono essere posizionati in maniera non appropriata per descrivere la discontinuità di una forma.

Sostanzialmente il laser scanner terrestre distanziometrico utilizzato funziona secondo il metodo di misura del tempo di percorrenza di un impulso laser: lo strumento calcola il tempo di percorrenza del tragitto di andata e ritorno del singolo impulso. Registrando una popolazione di punti molto densa, in una vasta area ed in un tempo relativamente breve si ottiene un sovra-campionamento della superficie investigata con il conseguente sensibile aumento della precisione del modello prodotto.

Tenuto conto che, comunque, in ogni applicazione l'accuratezza non è nota finchè il set di dati rilevato non viene confrontato con i dati di verità a terra, se considerata l'accuratezza su di una singola misura pari a 10 mm, tramite il calcolo dei minimi quadrati, il modello ottenuto può possedere una accuratezza di 1-2 mm.

Precisione

Riferita ai Laser scanner Terrestri la definizione di questo parametro va esaminata attentamente, tale specifica infatti, può essere applicata rispettivamente ai dati grezzi, ai dati modellizzati o ai prodotti elaborati.

Particolare attenzione va posta al fatto che in questo contesto, per esempio, la precisione sulla singola misura non è necessariamente indicativa della qualità del sistema. Infatti il parametro di precisione, totale pur essendo intrinsecamente composto dalla somma degli errori sistematici dello strumento (errore angolare, calibrazione, portata) risulta in realtà principalmente dipendente dal sovra-campionamento del dato rilevato (principio base con cui operano questo tipo di strumentazioni).

Molto più importante ed indicativa risulta invece essere la precisione angolare dello scanner, questa componente, riferita agli assi X e Z della singola misurazione, ha effetti che si ripercuotono direttamente sulla qualità del dato, in maniera costante, quando riferito al parametro di scarto di orientamento strumentale e proporzionale rispetto all'aumentare della distanza.

Risoluzione

La dimensione della più piccola quantità distinguibile dal sistema è la risoluzione.

Più precisamente può essere considerata pari all'ampiezza dell'angolo di rotazione del raggio laser tra due punti acquisiti adiacenti.

In generale i fattori che influenzano la risoluzione totale dello strumento sono: dimensione del punto rapporto segnale/rumore, divergenza del raggio e portata.

Sostanzialmente il parametro di risoluzione totale del sistema può essere classificato considerando due sottogruppi: profondità di risoluzione (Y) e risoluzione planare (X,Z).

La profondità di risoluzione da indicazione della sensibilità con la quale lo strumento avverte il minimo cambio di profondità. Questa misura può essere considerata come la media delle distanze dei punti contenuti nell'impronta del raggio laser sulla superficie indagata. Tale parametro è fortemente influenzato dalla divergenza del raggio in quanto l'informazione ricavata è mediata nell'area di impatto del raggio (SPOT) dal rapporto segnale/rumore e dalla precisione sulla portata.

La risoluzione planare (X,Z) da indicazioni sulla capacità dello strumento di distinguere la più piccola entità su di una superficie omogenea.

La dimensione fisica dell'impronta del laser e lo spazio tra i punti rilevati, influenzano in maniera proporzionale la risoluzione planare, ad esempio ad una data distanza se l'area dell'impronta risulta maggiore della scansione angolare del raggio stesso la risoluzione effettiva risulta pari al diametro medio dell'impronta.

Nella pratica il parametro di risoluzione planare è "responsabile" dell'identificazione di elementi altrimenti indistinguibili dal sensore stesso (colori diversi della vegetazione, scritte sui muri, ecc...).

In fase di post elaborazione del dato, abbinato ai valori di intensità retrodiffusa del segnale o dal valore di digital number del pixel di una eventuale ripresa RGB, permette una più realistica rappresentazione del modello rilevato.

Operativamente, la distanza tra il sensore e la superficie da rilevare determina il diametro dell'impronta e proporzionalmente per effetto del sovra-campionamento risulta più elevato il numero di punti della nuvola rilevata.

Per questo tipo di applicazioni, allo scopo generare modelli alla migliore risoluzione possibile e di conseguenza poter rappresentare nitidamente anche le minime variazioni morfologiche

della superficie indagata, l'impronta dovrà essere dimensionata in base alla scala di dettaglio che si vuole rappresentare.

Tenendo conto che la risoluzione finale dipende in massima parte dalla risoluzione angolare dello strumento, definito un passo minimo di spostamento tra singole scansioni, con distanza interasse i tra i punti decisamente inferiore alla dimensione dello spot è possibile rilevare superfici di dimensione inferiore dell'impronta.

Taratura

La calibrazione della strumentazione consente di uniformare l'errore nell'intero campo di scansione in maniera tale da evitare misure molto accurate sul nadir e molto scarse sui bordi della ripresa.

Fenomeni come la temperatura e la pressione atmosferica, l'intensità del segnale di ritorno dipendente dalla riflettività dell'area rilevata, influiscono sulla qualità del dato registrato. Come nel caso dell'utilizzo del laser scanner elitrasmportato, per l'esecuzione di una corretta registrazione, risulta necessario predisporre una accurata procedura di taratura che controlli statisticamente soprattutto le componenti di scansione diagonale di una area di test.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha riconfermato la validità degli standard qualitativi adottati nella pianificazione, nei rilievi di campagna e nelle fasi di pre/post elaborazione dei dati.

Per superare i limiti imposti dai software di trattamento dati, sono state affinate ulteriormente le procedure di elaborazione sviluppando appositi moduli per classificare, sfoltire e fondere i diversi dati strumentali.

Un ulteriore sviluppo futuro sarà possibile quando saranno disponibili sensori CCD ad alta risoluzione integrati agli strumenti laser che permetteranno di generare un prodotto con un'unica fase di acquisizione, la possibilità, oggi, di produrre immagini solide è quella di usare separatamente laser scanner e fotogrammetria con ovvi problemi di messa a punto di software che devono riconoscere e correlare automaticamente i marker (permanent scatter catarifrangenti) collocati sull'oggetto del rilievo ed associarli alle corrispondenti coordinate spaziali.

In generale è stata consolidata una metodologia operativa e di controllo che ha permesso di ottenere la restituzione di prodotti applicativi che rispettano le definizioni di precisione in maniera rigorosa e aventi effettive caratteristiche di aderenza alla realtà.

L'utilizzo di tali standard qualitativi come requisiti essenziali per l'utilizzo delle tecnologie laser scanner ad integrazione dei tradizionali sistemi di monitoraggio consente di operare un salto qualitativo nella conoscenza dei fenomeni franosi in generale e della frana del Passo della Morte in specifico. Si possono così generare DTM di alta qualità e i modelli di simulazione 3D derivati (corretti per il geoide locale) hanno elevata precisione pianoaltimetrica. Sono pertanto maggiori le possibilità di analisi sulle superfici indagate per derivare misure quantitative reali degli indicatori fisiografici e morfologici dell'area d'indagine.

BIBLIOGRAFIA

- A. Behan (2000), "Quality Improvement of Scanning Laser Altimeter Data". Delft University of Technology <http://www.geo.tudelft.nl>
- Carulli G.B., Frascari F., Semenza E. (1982): "Geologia delle Alpi Tolmezzine (Carnia)". In: Catellarin A. & Vai G.B. (a cura di) – "Guida alla geologia del Subalpino centro-orientale". *Guide geol.reg. S.G.I.*, 337-348, Bologna.
- CNR-IRPI Padova (2003): "Relazione finale prima fase – Convenzione tra la regione Friuli Venezia Giulia e l'IRPI – CNR per lo studio della frana del Passo della Morte in comune di Forni di Sotto (UD)". *Relazione interna*.
- Martinis B. (1985): "Il lago quaternario di Forni di Sotto" *In Alto*, 67, 71-83.
- Maso M. (2002): "Note sulle metodologie operative per i rilievi laserscanning e la generazione di DTM di alta qualità". *Rivista Cinquefiumi quad.*, n.1/2002, 23-33, Venezia.
- Maso M. Coren F. (2003) "Laserscanning and multibeam data integration to high resolution terrain mapping the brenta river case history" *Atti del convegno "Airborne remote sensing for geophysical and environmental application"*.
- Massari G., Potleca M., Stefanelli N. (2003): "Primi risultati geomorfologici da strisciate laser scanning della frana del Passo della Morte" *Convegno Nazionale Cartografia della Montagna*, Trento, Aprile 2003.
- Pisa G. (1972): "Geologia dei monti a nord di Forni di Sotto, Carnia occidentale" *Giorn. Geol. Ser.2*, 38 (2), 543-691.
- Venturini C. (1990): "Cinematica neogenico-quadernaria del Subalpino orientale (settore friulano)" *Studi Geologici Camerti*, vol. *spec.*, 109-116.
- <http://www.terrasolid.fi>
- <http://www.optech.on.ca/>
- <http://scanning.fh-mainz.de>
- <http://www.airbornelasermapping.com>