



ISSN 1590-2595

quaderni di geofisica

n. 40

GPS, FOTOGRAMMETRIA DIGITALE E LASER SCANNER: UN SISTEMA INTEGRATO DI RILEVAMENTO

Arianna Pesci, Dario Conforti,
Massimo Fabris, Fabiana Loddo

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

2006

Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Viviana Castelli (MI)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Sergio Gurrieri (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Leonardo Sagnotti (RM2)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (RM1)

Gianluca Valensise (RM1)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - responsabile

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

Sabrina Palone

Tel. +39 06 51860405

Fax +39 06 51860585

redazionecen@ingv.it

quaderni
di
geofisica



GPS, FOTOGRAMMETRIA DIGITALE E LASER SCANNER: UN SISTEMA INTEGRATO DI RILEVAMENTO

Arianna Pesci¹, Dario Conforti², Massimo Fabris³, Fabiana Loddo¹

*¹Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia- Sezione di Bologna
Via Donato Creti, 12
40128 Bologna*

*²CDA srl
Via Resegone, 34
Triuggio
20050 Milano*

³Dipartimento di Fisica, Settore Geofisica, Università di Bologna

Introduzione

Il grande sviluppo tecnologico degli ultimi decenni ha reso possibile la realizzazione di strumenti di rilievo geodetico e topografico ad alta precisione, compatti e maneggevoli, caratterizzati da notevole facilità di utilizzo, versatili e spesso corredati da software ad elevate prestazioni per la acquisizione, gestione ed elaborazione dati. La capacità di rilevare grandi porzioni di territorio con operazioni rapide, costi contenuti e generazione di risultati in tempi brevi, consente di superare i limiti dei metodi topografici classici ed ha portato ad una veloce diffusione di queste metodologie presso l'utenza.

I modelli digitali del terreno che forniscono una rappresentazione tridimensionale della superficie fisica della terra, derivati da tecniche di telerilevamento o da rilievi diretti, vengono sempre più utilizzati per la descrizione dettagliata e la gestione del territorio. Le diverse metodologie oggi disponibili (scansioni laser, interferometria radar, fotogrammetria, rilievi GPS cinematici, ecc.) forniscono dati che possono essere utilizzati singolarmente o integrati fra loro per soddisfare esigenze di precisione, rapidità di rilievo e completezza dell'informazione (Pesci et al., 2004).

Lo studio e l'analisi delle evoluzioni di eventi naturali quali frane, eruzioni vulcaniche ed instabilità dei versanti può essere effettuato mediante il confronto diretto fra modelli digitali riferiti ad epoche successive e co-registrati nello stesso sistema di riferimento (Achilli et al., 1997; Kaab and Funk, 1999; Baldi et al., 2000; Mora et al., 2003, van Westen et al., 2003).

In questo lavoro viene presentato un approccio multidisciplinare per il monitoraggio della frana di Rocca Pitigliana ubicata nella valle del fiume Reno (Appennino Bolognese): i modelli digitali sono stati estratti mediante applicazioni GPS in modalità cinematica, fotogrammetria digitale aerea e scansione laser terrestre.

La precisione interna di questi modelli dipende dalla tecnica utilizzata per il rilievo, dalle condizioni operative di applicazione e dalle caratteristiche morfologiche dell'area in esame.

Le applicazioni GPS in modalità cinematica sono principalmente limitate dall'accessibilità dell'area e dalla eventuale copertura dovuta alla presenza di ostacoli di diversa natura (boschi, fabbricati, ecc); la fotogrammetria aerea è soprattutto sensibile alle condizioni climatiche (nuvole, nebbia, fumo, ecc.), alla scala media del fotogramma e alla presenza di vegetazione; il laser scanner, la cui portata dipende

fortemente dalle caratteristiche di retrodiffusione dei materiali che formano la superficie, risente di avverse condizioni meteorologiche che limitano la visibilità in sito (nebbia, pioggia, ecc) (Wehr and Lohr, 1999).

I modelli ottenibili sono caratterizzati da precisioni che variano da pochi centimetri ad alcuni decimetri a seconda della tecnica utilizzata. Un loro utilizzo integrato, mediante confronto diretto, può essere effettuato quando le precisioni siano confrontabili o nel caso in cui la deformazione e le variazioni morfologiche avvenute tra due epoche successive siano di entità superiore alla accuratezza dei rilievi.

Nel seguito vengono brevemente illustrate le metodologie utilizzate, le applicazioni effettuate, le precisioni dei modelli ottenuti, i confronti ed i risultati del monitoraggio svolto nel periodo di tempo compreso tra il 1976 ed il 2003.

Tecniche di rilievo

Il GPS (Global Positioning System) è un sistema di posizionamento basato sulla ricezione di segnali radio emessi da satelliti posizionati in orbite a circa 20000 Km di altezza: la configurazione attuale permette la visibilità di almeno 4 satelliti in ogni istante e luogo del pianeta.

Si tratta di una tecnica di intersezione spaziale distanziometrica nel sistema di riferimento ellissoidico geocentrico WGS84. La distanza geometrica (range) tra il centro di fase dell'antenna di stazione a terra ed i satelliti, viene calcolata misurando il ritardo temporale tra il segnale ricevuto ed un clone generato dal ricevitore fornendo, in prima approssimazione, il tempo di volo del tragitto satellite-ricevitore. Il valore ottenuto moltiplicando il tempo di volo per la velocità della luce, in realtà, è alterato da parecchie cause di errore (quali la non perfetta sincronia degli oscillatori, rifrazione troposferica e ionosferica, interferenze elettromagnetiche, variazione del centro di fase dell'antenna, percorsi multipli (riflessioni), ecc.) complicando le procedure di analisi necessarie per il posizionamento.

Il segnale GPS è caratterizzato da una componente fondamentale, due onde sinusoidali chiamate L_1 e L_2 ($\lambda_1 \approx 19\text{cm}$ ed $\lambda_2 \approx 24\text{cm}$) e da una componente impulsiva, i due codici pseudo-random C/A e P ($\lambda_{C/A} \approx 300\text{m}$ e $\lambda_P \approx 30\text{m}$); viene inoltre inviato un messaggio di navigazione (codice D) nel quale sono presenti importanti informazioni quali lo stato di salute dei satelliti, le effemeridi (parametri per il calcolo delle orbite

te) e la deriva degli orologi di bordo.

Un ricevitore GPS geodetico è in grado di effettuare due tipi differenti di misure su entrambe le portanti L_1 ed L_2 : misure di codice e di fase. Nel primo caso, dalla misura del ritardo temporale tra il codice ricevuto e quello generato dal ricevitore, si ottiene l'interdistanza satellite-ricevitore, a meno degli errori dovuti alla non perfetta sincronizzazione degli orologi (pseudo-distanza) e alla propagazione del segnale in un mezzo diverso dal vuoto. Nel caso dell'osservazione dello sfasamento tra segnale delle portanti provenienti dai satelliti e la replica generata dal ricevitore, si ottiene una misura dell'interdistanza a meno di un numero intero di lunghezze d'onda (ambiguità di fase), che dovrà essere risolta in fase di analisi dati (Hofman-Wellenof, 1997).

Il posizionamento GPS può essere eseguito nelle modalità assoluta, relativa e differenziale e le misure effettuate in maniera statica o cinematica. Nel posizionamento relativo si riescono a raggiungere le precisioni maggiori (alcuni millimetri): vengono determinate le componenti del vettore linea-di-base che unisce due vertici GPS eliminando o, comunque, riducendo gli errori sistematici da cui sono affetti i range nelle due stazioni. I posizionamenti assoluto e differenziale, invece, forniscono le coordinate di un vertice in un sistema di riferimento globale; nel secondo caso, viene applicata una correzione differenziale alle distanze satellite-ricevitore, calcolate da una stazione di riferimento, per migliorare la precisione delle coordinate.

La differenza tra una applicazione statica e cinematica, come si può intuire dai nomi stessi, è che, nel primo caso, si permane sui punti di stazione per un certo intervallo di tempo mentre, nel secondo, il ricevitore è in continuo movimento.

Nelle applicazioni statiche l'uso dell'osservabile fase consente di raggiungere precisioni sub-centimetriche nel posizionamento relativo di punti posti anche a grande distanza.

Nel caso cinematico, dove compare la dipendenza dal tempo delle coordinate del ricevitore mobile, il sistema di equazioni è risolvibile, epoca per epoca, solo con un numero minimo di 4 satelliti visibili, dopo avere eliminato i termini di ambiguità dalle incognite mediante specifiche procedure di inizializzazione e di trattamento dei dati (Beutler et al., 1995). In questo caso è ancora possibile determinare la posizione istantanea dell'osservatore mobile con accuratezze centimetriche.

I risultati che verranno presentati, in termini di coordinate dei punti, sono espressi nel

sistema di riferimento WGS84 e successivamente trasformati nel sistema cartografico UTM per una corretta rappresentazione.

La fotogrammetria è una tecnica di misura che permette di ottenere informazioni metriche sulla forma e dimensione di un oggetto a partire dall'analisi di fotogrammi o immagini digitali acquisiti da punti di vista diversi. Dal punto di vista analitico, stabilito il sistema di riferimento, le relazioni tra coordinate dei punti immagine e dei corrispondenti punti oggetto dipendono da 9 parametri che descrivono le caratteristiche geometriche della camera (orientamento interno) e la posizione del piano immagine (orientamento esterno).

Le metodologie di rilievo della fotogrammetria si dividono in terrestre, aerea e satellitare e sono caratterizzate da differenti distanze camera-oggetto e, in generale, dalle diverse scale delle immagini.

I prodotti che si ottengono sono coordinate di punti oggetto in un sistema tridimensionale o modelli digitali del terreno (DTM), fotografie rettifiche (ortofotopiani) o mappe da esse derivate (ortofotocarte).

La fotogrammetria aerea è un metodo molto utilizzato nei rilievi topografici: per ricoprire l'area interessata e poterla quindi restituire, occorre che ogni punto del terreno sia ripreso almeno da due fotogrammi; per questo generalmente le immagini vengono acquisite con una sovrapposizione longitudinale di circa il 70% e trasversale del 30% (in funzione anche della morfologia dell'area). La successione di più fotogrammi longitudinali viene chiamata strisciata e la successione di più strisciate costituisce il blocco fotogrammetrico.

Tra le varie modalità che conducono alla generazione di modelli digitali del terreno, la fotogrammetria digitale (Kraus, 1998) risulta particolarmente efficace poiché, attraverso l'uso di procedure automatiche e semiautomatiche, ha notevolmente semplificato le operazioni di restituzione, tra le quali quella di generazione di DTM.

Attualmente le immagini possono essere ottenute tramite camere digitali o dalla scansione di foto tradizionali su pellicola. I DTM possono essere realizzati utilizzando unità di restituzione digitali che consentono l'elaborazione di immagini stereoscopiche al computer. Tali unità permettono diversi livelli di automazione delle varie fasi di elaborazione, tra le quali la generazione di DTM mediante algoritmi di correlazione automatica che identificano, sulla base del contenuto radiometrico (livelli di grigio) e delle forme, aree omologhe, ricercando il massimo grado di correlazione. Questa procedura può

richiedere anche serie di interventi manuali o di 'editing', là dove il sistema non riesce a correlare a causa della scarsa illuminazione, morfologia complessa, presenza di vegetazione.

I principali parametri da cui dipende l'accuratezza della restituzione sono la scala e la risoluzione dell'immagine, e quindi le caratteristiche della camera e la quota di volo.

Altri parametri che influiscono sull'accuratezza finale del prodotto sono la qualità dell'immagine, la presenza di zone in ombra e la morfologia della superficie. L'accuratezza teorica che può essere raggiunta nella posizione dei punti, e in particolare della loro quota, si valuta intorno allo 0,01-0,02% della altezza di volo sul terreno: per esempio, ad una quota di 1000 metri e per una scala 1:5000, l'accuratezza è di 10-20 cm.

Con questa metodologia è possibile generare modelli digitali del terreno ad alta risoluzione e precisione, che rendono il metodo adatto per un ampio spettro di applicazioni, considerando tempi e costi di produzione; il rilievo fotogrammetrico rappresenta in alcuni casi il metodo migliore per generare un DTM accurato di zone non facilmente accessibili.

I sistemi laser a scansione offrono nuove ed interessanti possibilità nel rilievo topografico, anche in zone morfologicamente complesse e di non facile accesso (Gordon et al., 2001).

Si tratta di dispositivi ottico-meccanici capaci di emettere un impulso elettromagnetico (laser) e di ricevere il segnale riflesso dal terreno, misurando l'intervallo di tempo intercorso (tempo di volo), e quindi la distanza tra il centro dello strumento ed il punto rilevato. Al calcolo del tempo di volo viene associata anche una misura angolare di precisione che permette di collocare i punti in un sistema di riferimento locale, riferito al centro ottico dello strumento. Per ogni misurazione, oltre alle coordinate cartesiane (x, y, z), il sistema fornisce l'intensità del segnale di ritorno e definisce la risposta radiometrica della superficie rilevata.

Il raggio laser viene deflesso mediante un meccanismo di specchi rotanti ed oscillanti, variando l'angolo azimutale e zenitale per passi discreti, illuminando il terreno in punti contigui. Il sistema opera in modo automatico ed è in grado di misurare anche migliaia di punti al secondo.

Il risultato di un rilievo laser consiste in una nuvola di punti di coordinate note che descrivono la superficie dell'oggetto scansionato, ai quali è associato un valore di riflettività che, se rappresentata mediante toni di grigio, consente di visualizzare in maniera immediata la morfologia.

Attualmente vengono utilizzati laser che coprono la banda ottica tra 800 e 1600 nm con divergenze generalmente comprese tra 0.2 e 3 mrad. La frequenza con cui vengono emessi gli impulsi è estremamente elevata (1000-10000 pts), permettendo una scansione estremamente veloce del territorio; il sistema prevede un tempo minimo di attesa prima di emettere il segnale successivo in base alla portata massima del laser utilizzato, e tale da non sovrapporre gli intervalli di tempo relativi ad ogni singolo impulso (cioè il tempo tra l'emissione del segnale e la ricezione degli echi riflessi).

Inoltre, la capacità di discriminare più risposte dello stesso impulso laser (la prima e l'ultima, per esempio) consente di definire sia il terreno che gli oggetti posti su esso (si pensi ad una rete metallica di recinzione tra due campi, alla vegetazione, ecc.).

La distanza operativa massima di questi strumenti è dell'ordine di diverse centinaia di metri.

La precisione di una singola misura laser varia al variare della distanza e dell'angolo di incidenza del raggio ed è data dalla combinazione di tutti gli errori insiti nel sistema: errore nel calcolo del tempo di volo (definito dall'elettronica e dal misuratore del tempo), errore di portata (massima distanza teorica misurabile), errore meccanico angolare (spostamento degli specchi rotanti), errore di incidenza del raggio, ed errori di calibrazione. In generale, su distanze dell'ordine dei 100 m, queste precisioni sono comprese in un range di 0.5-2.5 cm. Tuttavia, il punto di forza di questa tecnologia è la capacità di sovracampionare il target rilevato, aumentando così la precisione del risultato finale fino a raggiungere valori millimetrici (Liciti, D., 2004).

Ogni rilievo laser, acquisito da un differente punto di presa, è definito in un suo sistema di riferimento. Per ottenere un unico modello tridimensionale è necessario concatenare le scansioni, trasferendole in un sistema comune mediante il riconoscimento di punti naturali (rocce, spigoli, ecc.) o target artificiali; inoltre per aumentare la precisione del risultato finale è possibile e utile utilizzare algoritmi (ICP) di correlazione di forme e minimizzare i residui per un allineamento più accurato.

La frana di Rocca Pitigliana

Le frane presenti nell'Appennino Bolognese sono fondamentalmente indotte dalle precipitazioni che coinvolgono coperture prevalentemente argillose. Queste coprono più del

30% dei versanti e sono soggette a ripetute riattivazioni, spesso innescate da una serie di rotture localizzate per lo più nella scarpata principale (Regione Emilia-Romagna, 1999; Bertolini and Pellegrini, 2001). I movimenti che ne derivano possono poi propagarsi lungo il versante e riattivare l'intero deposito in frana, generando una tipica forma allungata di profondità limitata e con un piede lobato (risultato di ripetuti movimenti lenti di terra).

In particolare, durante la fase iniziale, nelle parti più ripide della scarpata principale, avvengono piccoli movimenti roto-traslazionali che, scaricando il loro peso sul corpo di frana, causano una serie di rotture lungo la superficie

d'acqua.

L'elevata franosità dipende innanzitutto da cause geologiche connesse alla qualità stessa degli ammassi rocciosi ed al loro stato di degradazione meteorica, e da cause fisiche, generalmente rappresentate da precipitazioni intense e prolungate, fusione del manto nevoso e terremoti.

L'area interessata dalla frana di Rocca Pitigliana (Comune di Gaggio Montano, Bologna) si trova sul versante in destra idrografica del torrente Marano, affluente sinistro del fiume Reno ed il corpo di frana si estende tra 674 m e 435 m di quota s.l.m. (Fig. 1).

Nella zona affiorano terreni caotici, in

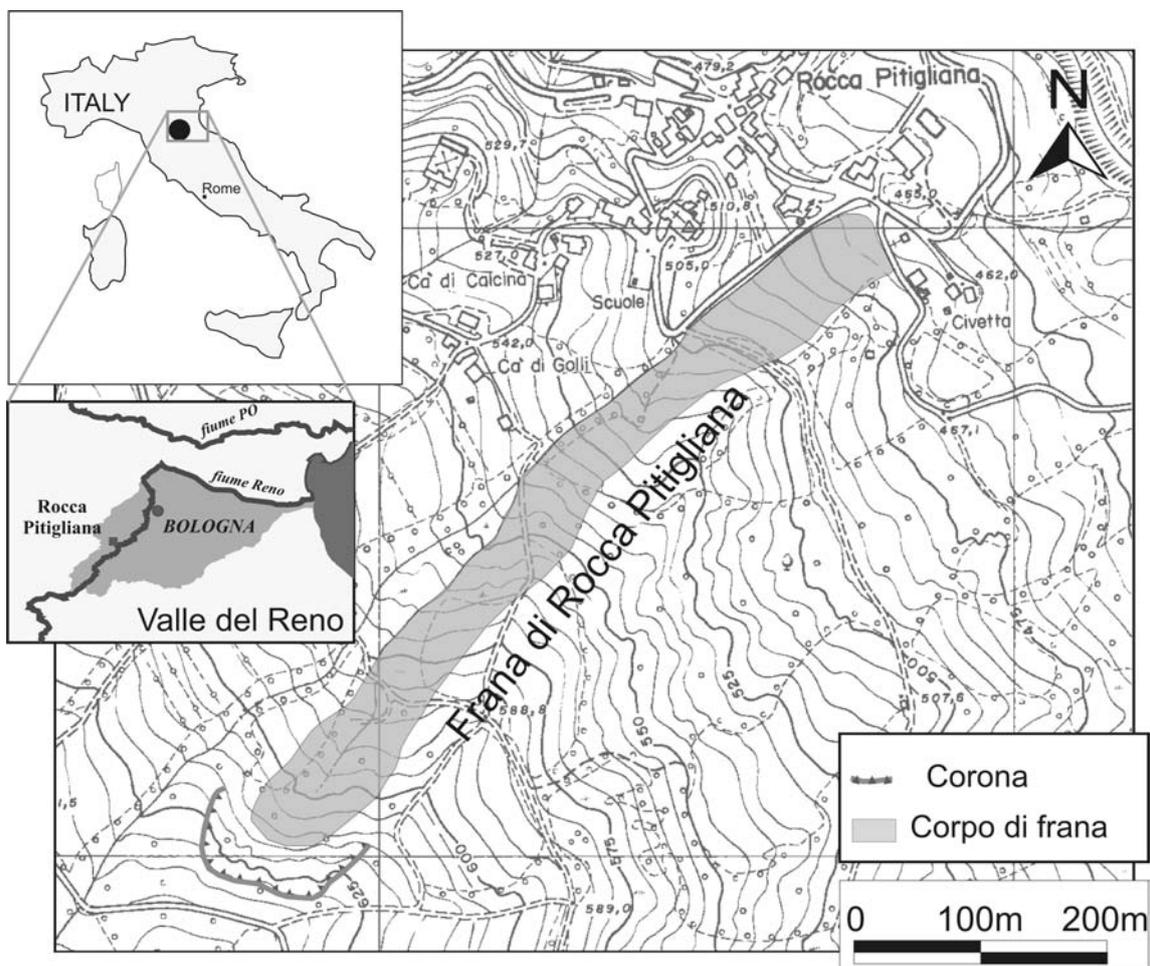


Fig. 1 Inquadramento topografico della frana di Rocca Pitigliana.

basale di scivolamento e si propagano lungo il versante innescando un meccanismo che evolve in colata (Esu, 1977; WP/WLI, 1993).

I danni di tipo sociale ed economico sono generalmente alti e difficilmente quantificabili; dipendono dalla presenza di abitati nei pressi di frane attive e, in alcuni casi, dal rischio idraulico connesso a possibili sbarramenti dei corsi

passato indicati come "Argille Scagliose": recentemente, nella cartografia geologica della Regione Emilia-Romagna a scala 1:10000 e nelle successive a scala 1:25000, tali litotipi sono stati attribuiti alla formazione delle Argille Palombini (Pini, 1999).

Il bacino in cui si sviluppa la frana ha una superficie di circa 3 ha ed il fenomeno franoso



Fig. 2 Fotografia scattata nel Novembre 1999: riattivazione della frana di Rocca Pitigliana e conseguente interruzione della strada comunale.

si estende per una lunghezza di circa 1300 m e larghezza massima di 50 m. In riferimento alla classificazione di Cruden & Varnes (1996) la frana di rocca Pitigliana può essere definita come complessa di riattivazione, con una distribuzione dell'attività in avanzamento: il meccanismo è definito complesso in quanto formato da una cascata di scivolamenti rotazionali di piccole dimensioni che evolvono in colata per fluidificazione dei materiali mobilizzati.

La prima notizia del fenomeno franoso risale al 6 marzo 1934: il giornale locale (Resto del Carlino) riportò la distruzione di 5 edifici, lo sconvolgimento dei campi coltivati di 8 poderi e lo sbarramento dell'alveo del torrente Marano. Altre date, documentate in letteratura sono il 29 maggio 1939, il 2 giugno 1939, il 26 aprile 1965 ed il 14 aprile 1994. La riattivazione significativa più recente risale al novembre 1999, quando fu completamente interrotta la strada comunale del paese di Rocca Pitigliana (Fig. 2). In collaborazione con la Comunità Montana Alta e Media Valle del Reno, nel 2002 si è intrapresa una serie di monitoraggi finalizzati alla verifica della presenza di smottamenti, anche a seguito dei lavori di consolidamento eseguiti nell'inverno 2002-2003.

La rete GPS esterna

La materializzazione di una rete geodetica locale si è resa necessaria al fine di determinare il sistema di riferimento in cui inserire i modelli digitali del terreno ottenuti mediante le tecniche di rilievo precedentemente illustrate.

I lavori si sono susseguiti utilizzando inizialmente una rete di riferimento di piccole dimensioni ed alta precisione posta nell'intorno della frana stessa; successivamente sono state istituite e misurate due ulteriori reti, una ad alta densità posta nell'area soggetta a deformazioni, ed una seconda a maglia più larga, utilizzata per l'appoggio fotogrammetrico.

Nel Maggio 2002 è stata effettuata una ricognizione dell'area da monitorare che ha portato alla scelta di 3 siti idonei all'installazione di stazioni permanenti e semipermanenti secondo i seguenti criteri: buona visibilità dei satelliti, assenza di ostacoli alla ricezione del segnale, stabilità del punto di stazione nel tempo e vicinanza all'area di frana.

Le stazioni di riferimento, inizialmente semipermanenti, sono state monumentate su affioramenti rocciosi (MAST e INCB) e su un muro di sostegno in cemento armato (PARC) (fig.3 e 4). Dal novembre 2002 la stazione MAST è divenuta permanente.



Fig. 3 Rete GPS di riferimento. Le stazioni MAST, PARC ed INCB sono situate esternamente alla frana in un'area supposta e misurata stabile; la stazione PILL, monumentata su piastrino nella parte alta della frana, ha lavorato come stazione permanente contemporaneamente a MAST.



Fig. 4 Le stazioni di riferimento: a) MAST b) PARC c) INCB.

Per poter assicurare una buona stabilità nel posizionamento dell'antenna geodetica sono stati utilizzati apparati ad alta precisione 3-D per i vertici MAST e PARC, mentre per INCB, materializzato con una testa di cavicchia semi-sferica di acciaio inox dotata di centrino, si è utilizzato un treppiede munito di basetta IGM. Il sistema di autocentramento 3-D, mostrato in figura 5, è costituito da 4 componenti in acciaio

inox: l'antenna viene avvitata sulla flangia superiore del sostegno orientabile e verificabile mediante bolla sferica. Tale tipo di monumento consente la sostituzione delle antenne senza introdurre errori sistematici di misura: l'altezza è fissa e il riferimento verticale ed orizzontale sono costanti (Anzidei, 2003).

Nel settembre 2002, inoltre, è stato realizzato un piastrino geodetico in cemento armato

BASE 3-D

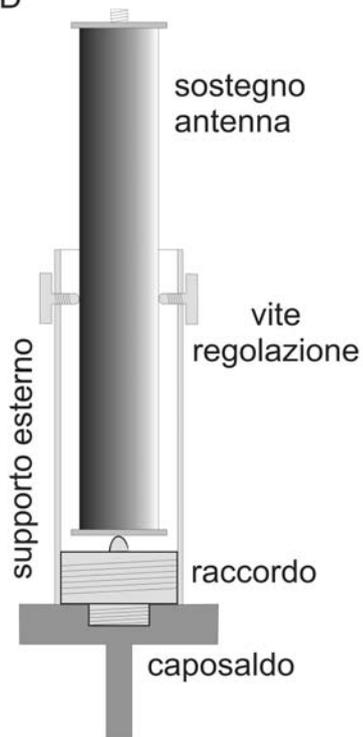


Fig. 5 Schema dell'apparato 3D ad alta precisione, caposaldo e centrino geodetico (da sinistra a destra in figura). Il caposaldo, inserito su roccia o cemento, fornisce la base filettata su cui avvitare il supporto esterno del 3D: mediante le viti di regolazione il sostegno dell'antenna, dotato di bolle, viene fissato in posizione verticale. La foto in basso a destra rappresenta un comune vertice GPS e, mediante treppiede, basetta regolabile o altro, l'antenna viene posizionata sulla verticale passante dal suo centro.

all'interno del corpo di frana nella zona di nicchia; come mostrato in figura 6, la parte esterna di forma cilindrica con raggio di 0.15 m e alta 1 m, è saldamente ancorata ad un blocco di cemento che affonda interamente nel terreno, rendendolo solidale ad esso. La stazione PILL, installata sul piastrino con autocentra-

mento 3D, è diventata anch'essa permanente nel dicembre 2002: sono state pianificate sessioni di misura giornaliera della durata di 3-4 ore, contemporanee alle osservazioni di MAST.

Nella configurazione finale della rete geodetica di riferimento della frana di Rocca Pitigliana (Fig. 3) le interdistanze tra le stazioni

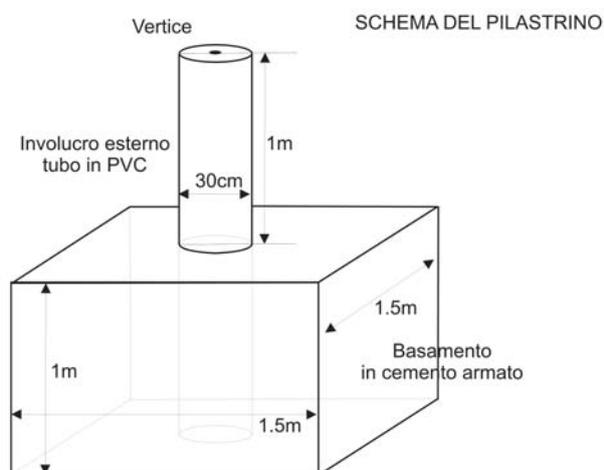


Fig. 6 La stazione permanente PILL: si tratta di un piastrino in cemento armato costruito su un basamento che affonda interamente nel terreno. La stazione è stata alimentata mediante pannello solare.

variano tra i 380 e 760 m circa: i tre vertici MAST, INCB e PARC, assicurano un inquadramento stabile della frana.

La rete di appoggio fotogrammetrica

Nel marzo 2003 sono stati scelti, sulle fotografie aeree, dei punti naturali riconoscibili e tuttora esistenti in aree ritenute stabili: muri di contenimento, spigoli di fabbricati, tetti, marciapiedi, elementi rocciosi ed altro ancora (Fig. 7).

La rete di appoggio, utilizzata per orientare le immagini fotogrammetriche, è costituita da 21 punti di controllo misurati mediante il GPS le cui monografie sono allegate in appendice A.

La rete GPS interna

Successivamente alla monumentazione della rete esterna sono stati materializzati dei vertici, sia nell'area di nicchia (Giugno 2002) che lungo il corpo di frana (Novembre 2002). Sono stati utilizzati dei centrini geodetici inseriti su massi di grandi dimensioni, parzialmente inglobati nel terreno e supporti solidali ad esso, e picchetti di ferro della lunghezza di 1 m e diametro di 12 mm.

I picchetti sono stati infissi nel terreno fino ad una profondità di circa 80 cm (Fig. 8).

Le reti GPS interna ed esterna ed i punti di controllo fotogrammetrici sono stati misurati nell'ambito del progetto di monitoraggio secondo gli schemi riportati nelle tabelle in appendice B: per ogni rilievo di tipo statico o cinematico sono forniti dati inerenti l'epoca di misura, modalità, strumentazione utilizzata, passo di

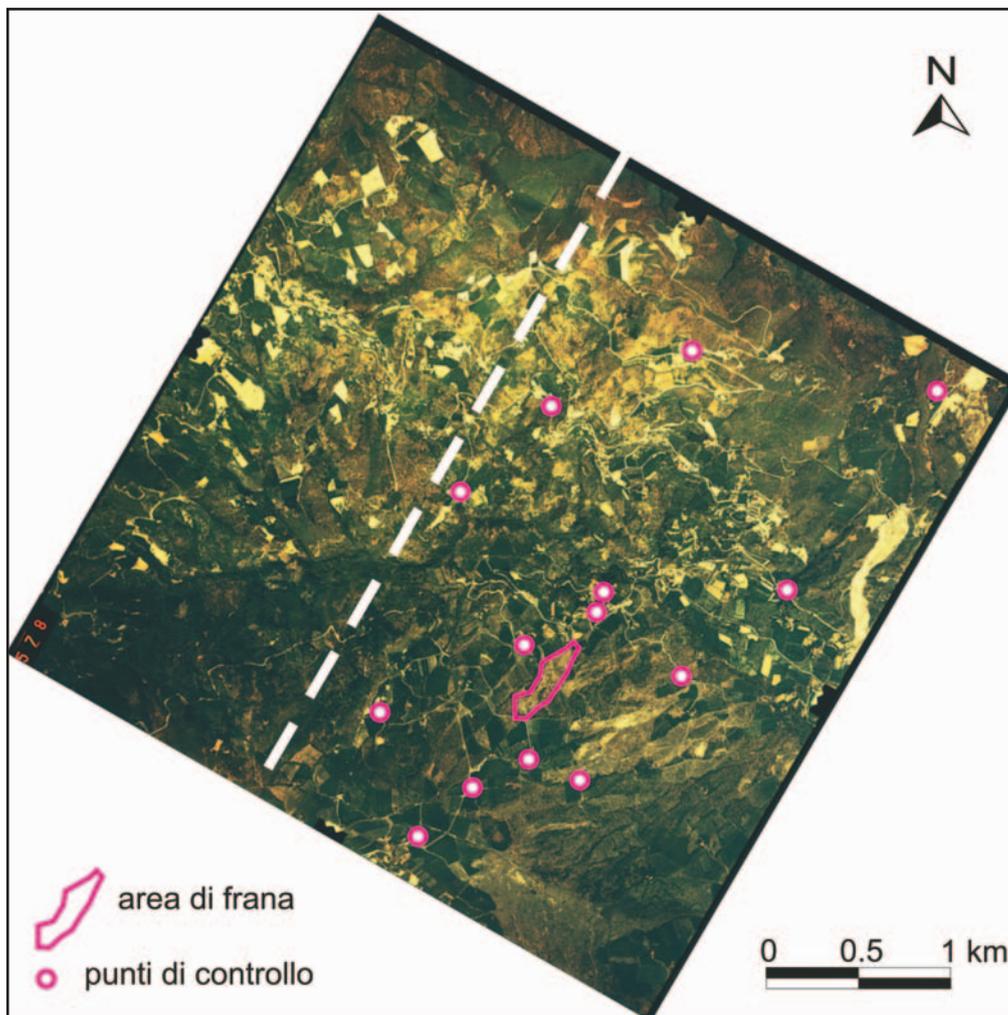


Fig. 7 Fotografia aerea relativa ad un volo fotogrammetrico effettuato nel 1976. Sono indicati i punti di controllo (cerchietti) mediante i quali è avvenuto il processo di orientamento delle immagini. L'area di frana è indicata dalla linea fucsia. La linea bianca tratteggiata mostra la porzione di territorio comune alla coppia di immagini utilizzate per l'elaborazione stereoscopica.

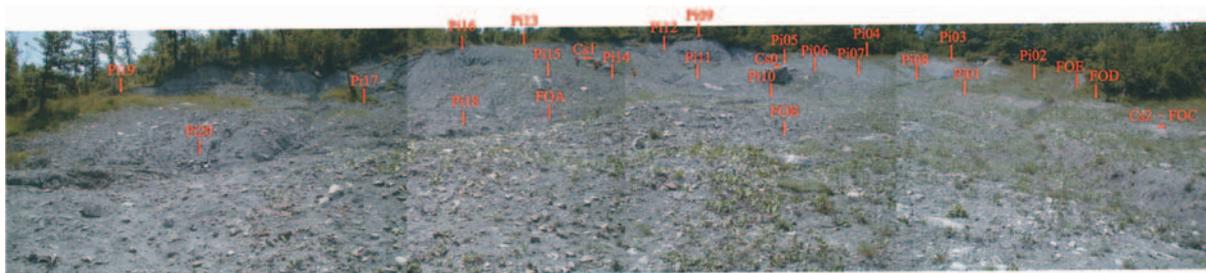


Fig. 8 La rete interna costituita da numerosi picchetti, inseriti nel terreno per 80 cm circa. La figura è stata ottenuta unendo in sequenza cinque fotografie scattate da un punto sottostante la nicchia. Questa immagine srotolata fornisce una visione completa a raggiera.

campionamento e tempo di occupazione.

Tutti i vertici GPS ed i punti di appoggio fotogrammetrici sono stati misurati nell'ambito di numerose campagne di misura (appendice B) e le coordinate dei punti stabili sono state ottenute compensando tutte le soluzioni. In tal modo è stato possibile ottenere un set di coordinate di riferimento dell'area in esame.

Rilievi GPS cinematici

Fra le diverse attività svolte per il con-

trollo delle deformazioni sono stati eseguiti due rilievi cinematici dell'area in esame per ottenere modelli digitali del terreno riferiti ad epoche successive: il primo è stato effettuato mediante due campagne di misura consecutive (settembre 2002) ed ha interessato l'intera superficie di frana (nicchia, corpo e piede) mentre il secondo (marzo 2003) è stato limitato alla sola area di nicchia (Fig.9). La rimanente parte infatti è stata contemporaneamente modificata causa frequenti e numerosi interventi di consolidamento che il comune ha progettato ed attuato tra il 2003 ed il 2004, modificandone notevol-

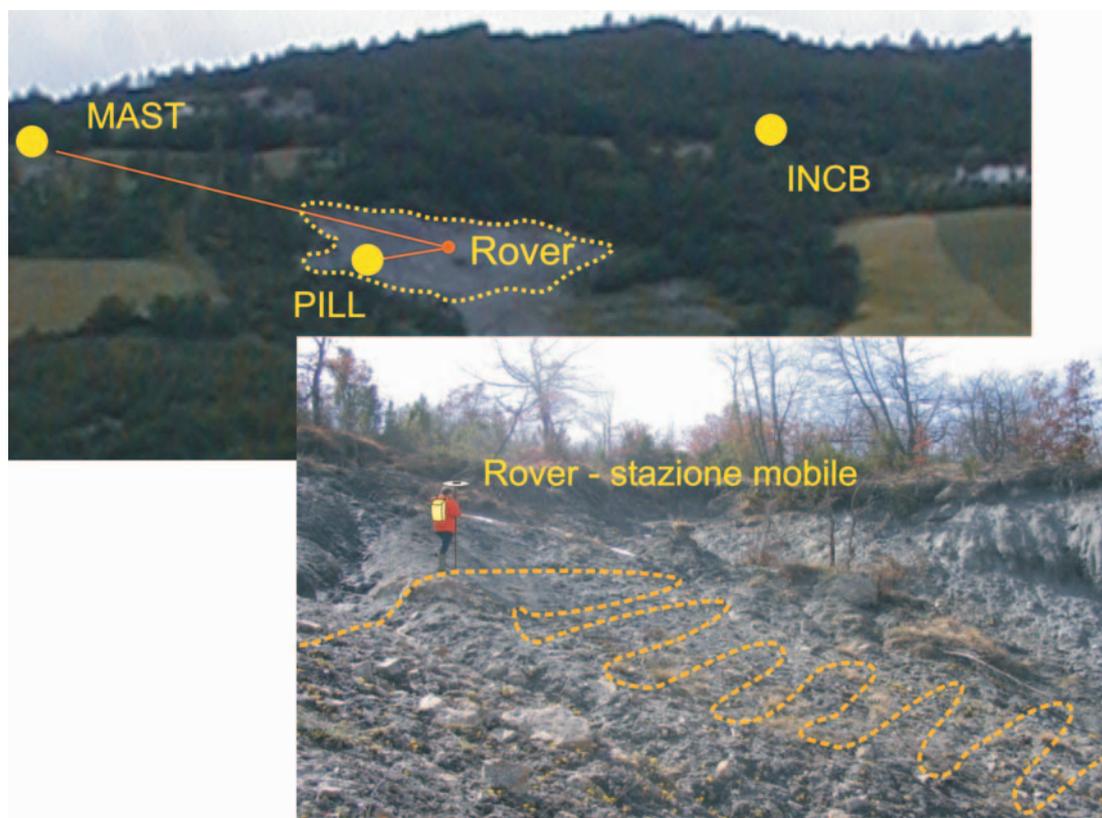


Fig. 9 L'operatore cammina sull'area di frana mantenendo l'antenna, posta su un asta di lunghezza nota, in posizione verticale. L'acquisizione del segnale con passo di campionamento di 1 s, consente di rilevare approssimativamente la superficie della frana con una copertura media di un punto a metro quadro.

<i>punto</i>	Δt (s)	$\sigma(m)$	<i>Residui (m)</i>
Cs01	69	0.009	-0.013
Olisto	170	0.009	-0.011
P2	62	0.013	0.014
P3	76	0.007	-0.016
P4	61	0.012	0.012
P5	73	0.008	0.020
P6	70	0.006	-0.004
P7	83	0.006	-0.016
P8	69	0.005	0.002
P11	69	0.005	0.012
P14	72	0.005	0.006
P15	62	0.008	0.029
P16	68	0.005	-0.021
P17	63	0.005	-0.008
totale osservazioni 1067		σ totale 0.007m	Media = 0.001m $\sigma = 0.015m$

mente la morfologia.

Le osservazioni sono state effettuate utilizzando due stazioni di riferimento in acquisizione continua ed una stazione mobile (rover) con passo di campionamento a 1 secondo: la prima (MAST), posta in un'area esterna alla frana e supposta stabile, la seconda (PILL) interna ad essa (Fig. 9).

In questo contesto è stato possibile verificare la precisione reale del metodo mediante numerosi accorgimenti tecnici, primo fra tutti la sosta su vertici di posizione nota e la programmazione dello schema di rilievo: in particolare si è operato in maniera tale che la traccia dell'operatore presentasse un elevato numero di intersezioni, utilizzate per determinare la precisione interna del rilievo.

In figura 10 sono evidenziati i vertici GPS monumentati lungo la frana ed il tracciato dell'operatore. Durante l'acquisizione, il ricevitore mobile ha stazionato per alcuni minuti su ogni punto segnalizzato e le nuvole di coordinate ottenute, riferite alle epoche di stazione, sono state analizzate. Il rilievo cinematico eseguito nel Settembre 2002 viene rappresentato nella figura seguente per fornire un esempio della procedura operativa da seguire in campagna al fine di un risultato consistente e preciso.

I vertici GPS mostrati in figura 10 (cer-

chietti neri) sono stati misurati durante il rilievo cinematico posizionando l'antenna per alcuni minuti verticalmente sopra ad essi. Questa operazione è stata eseguita mantenendo manualmente la posizione per alcuni minuti, tempo necessario per raccogliere un sufficiente numero di osservazioni (1 dato al secondo) che, elaborate successivamente, fornissero una statistica soddisfacente.

In figura 11 è mostrata la statistica delle distribuzioni delle coordinate altimetriche nei punti di controllo: le quote mostrano variazioni comprese entro un intervallo massimo di +/- 2.6 cm, validando le precisioni nominali del metodo cinematico: è importante anche tenere presente che l'antenna è stata mantenuta manualmente in posizione vertica-

Tab. 1 Confronto tra i valori delle coordinate altimetriche ottenuti in modalità cinematica (media delle misure) e misurati in modalità rapido-statica. Nella seconda colonna vengono riportati gli intervalli di misura cinematica sui singoli punti, nella terza le deviazioni standard delle distribuzioni delle singole misure cinematiche (fig. 11); nella quarta colonna infine, sono riportate le differenze fra 'coordinate cinematiche' e 'coordinate statiche'.

le sui punti GPS, introducendo possibili errori sulla misura. La distribuzione dei residui è influenzata dalla difficoltà nel mantenere manualmente fissa l'asta che sorregge l'antenna: nonostante ciò i valori medi delle misure e gli errori ad essi associati sono estremamente contenuti, essendo mediamente di 0.7 cm (media delle deviazioni standard).

Oltre alla verifica della precisione interna nella misura cinematica, si è operato per verificarne l'accuratezza ed escludere la presenza di eventuali sistematismi. A questo scopo è stato effettuato un controllo utilizzando le coordinate dei punti GPS ottenute da precedenti campagne di misura in modalità rapido-statica, notoriamente più precisa dell'approccio cinematico: su ogni punto è stata calcolata la differenza tra la media delle determinazioni cinematiche e il valore di riferimento noto a priori (Tab. 1).

I risultati confermano ampiamente le accuratèzze teoriche previste (Rizos and Han, 1997) mostrando valori compresi tra 0.2 e 2.9 cm.

La situazione è differente nel caso l'operatore sia in continuo movimento per cui, sebbene teoricamente le equazioni siano risolte in maniera efficiente per ogni epoca di osservazione, il posizionamento potrebbe discostarsi sensibil-

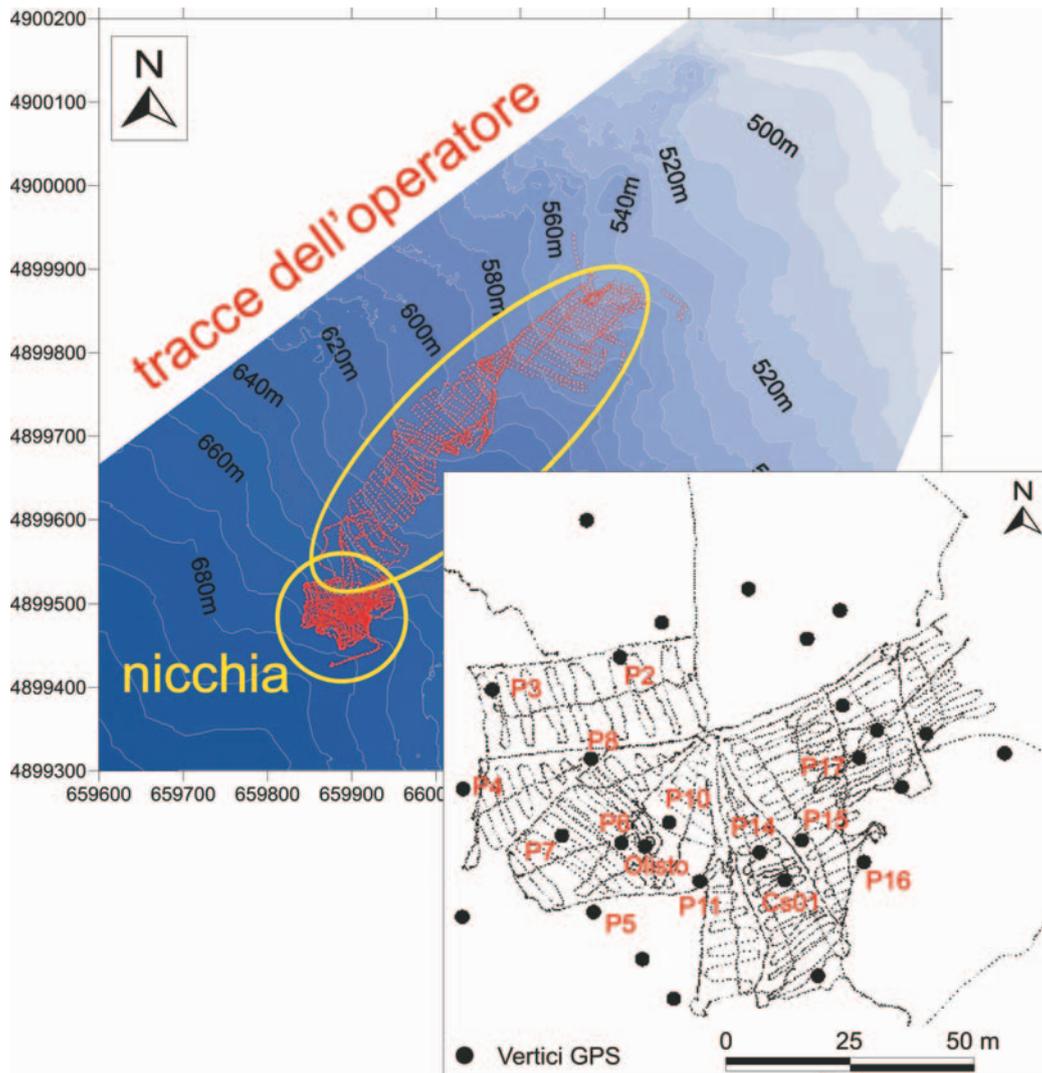


Fig. 10 Rilievo cinematico del settembre 2002: traccia dell'operatore. L'acquisizione è avvenuta mediante ricevitore trimble 4700 con passo di campionamento di 1 secondo. La distribuzione dei punti forma una griglia irregolare a maglia media di 1 metro. Le zone più irregolari sono state rilevate con una maggiore densità di punti. I cerchietti neri indicano la distribuzione di vertici GPS su cui l'operatore ha stazionato alcuni minuti per testare le precisioni del metodo utilizzato in tale modalità di rilievo. Durante la misura l'antenna è stata mantenuta verticale misurando i punti GPS e creando intersezione tra le tracce.

mente dalla realtà per motivi pratici: una scarsa praticabilità del terreno e la presenza di alta o bassa vegetazione possono interferire con il corretto posizionamento dell'antenna durante il tragitto. Inoltre la presenza di ostacoli e/o zone di copertura possono provocare una parziale perdita di segnale rendendo necessaria una re-inizializzazione e compromettendo l'affidabilità delle misure per un certo numero di epoche: per individuare ed eliminare le misure errate, si è ricorso ad un confronto diretto tra le tracce ottenute dall'analisi del vettore 'MAST-rover' e 'PILL-rover'.

La figura 12 mostra chiaramente l'epoca in cui è stato perso il segnale (causa copertura antenna) ed il tempo impiegato per la re-ini-

zializzazione, di alcuni minuti: la serie temporale delle coordinate stimate in questo periodo rivelano variazioni di alcuni metri dal trend medio atteso (figura 13).

Come accennato in precedenza, il movimento dell'operatore causa errori sistematici di posizionamento per cui è necessario stimare un valore reale della precisione cinematica. A questo scopo è stata utilizzata un'analisi di crossover (van Gysen et al., 1997) basata sulla ricerca dei punti matematici di intersezione tra le tracce indipendenti e sul confronto delle differenze di quota relative a tale punto: in figura 14 è mostrato lo schema della procedura.

Il percorso dell'operatore viene accuratamente pianificato prima della campagna di

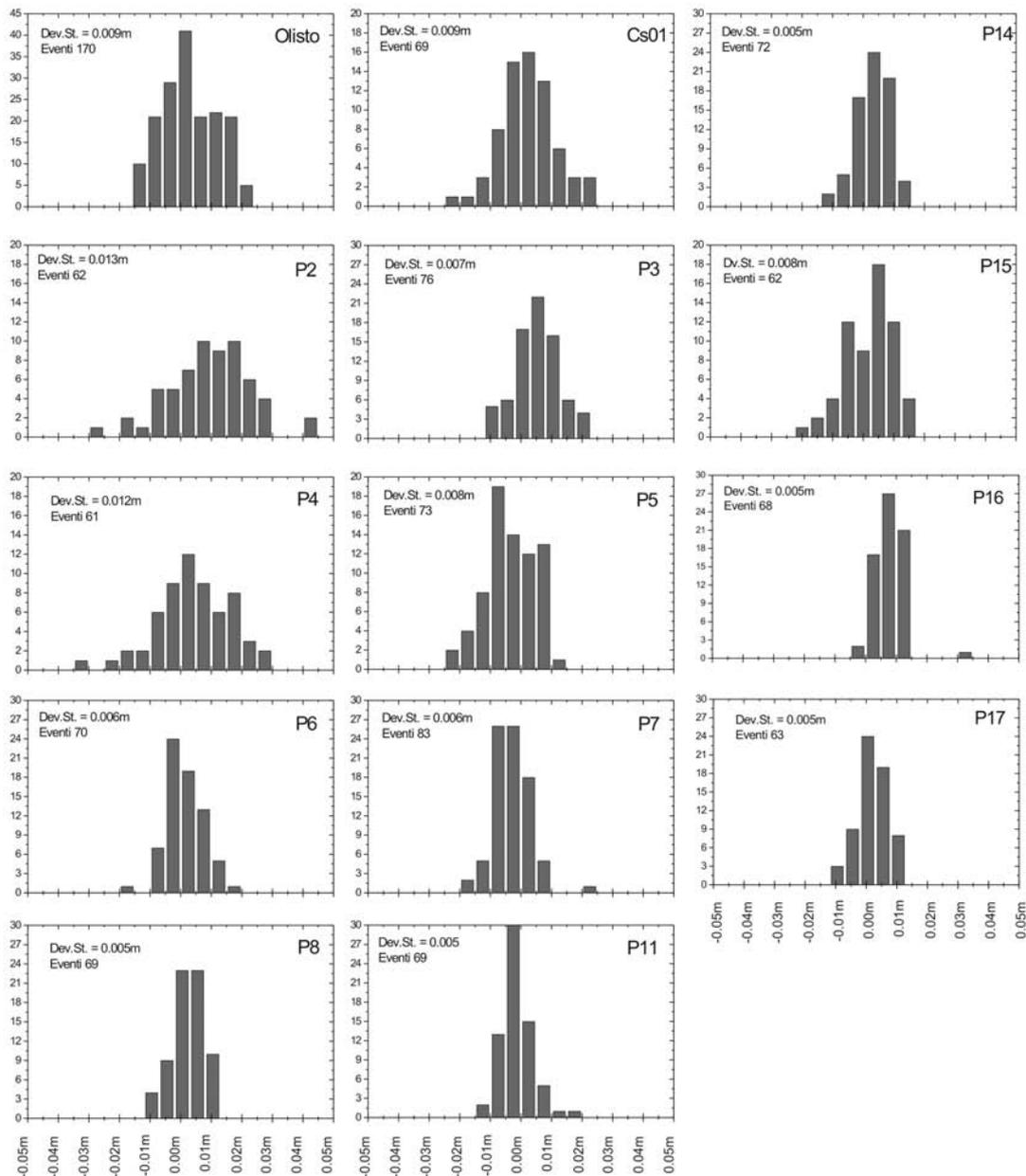


Fig. 11 Rilievo cinematico 2002: distribuzione delle coordinate altimetriche dei punti rispetto al valor medio rilevati durante le soste sui vertici GPS di coordinate note. La dispersione dei dati è mediamente dell'ordine di un paio di centimetri e conferma la precisione interna del metodo cinematico.

misura in modo da ottenere un numero consistente di intersezioni sufficienti per verificare l'accuratezza del rilievo: in figura 15 sono mostrate le distribuzioni dei residui ed i valori di media e deviazione standard per le due campagne cinematiche effettuate nel Marzo e Settembre 2003. I valori ottenuti sono considerati rappresentativi della precisione interna del modello cinematico, che risulta di circa 10 cm. L'analisi di cross-over è stata effettuata su due data set per ogni campagna, il primo (sinistra) ottenuto dal processamento della linea di base MAST-rover, il secondo (destra) dal dato PILL-rover. La doppia analisi è stata introdotta

per verificare ulteriormente il risultato e, come mostrato in precedenza (fig.12) per individuare le perdite di segnale e rimuovere i sistematici.

Il rilievo GPS in modalità cinematica è uno strumento estremamente efficace per rilevare le superfici con precisioni elevate e le analisi mostrate nelle pagine precedenti dimostrano l'accuratezza finale interna del modello. Il risultato finale consiste in una distribuzione di punti georeferenziati, distribuiti irregolarmente nell'area di indagine. Il lavoro di campagna, il processamento dati e l'analisi dei risultati sono operazioni estremamente veloci

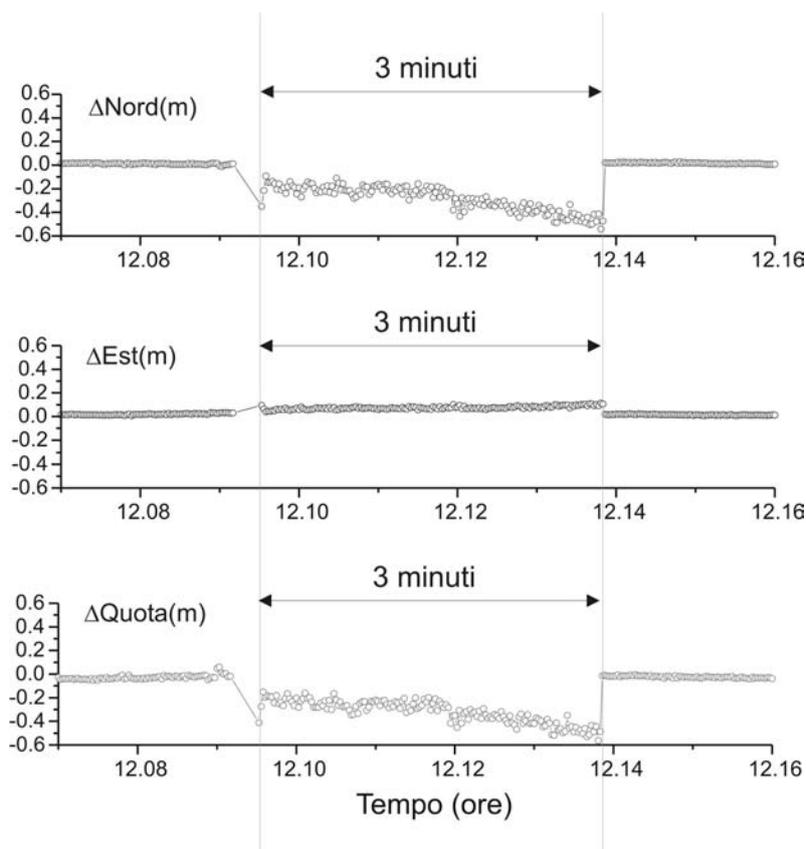


Fig. 12 Metodo di ricerca delle epoche in cui, a causa di una perdita di segnale, è necessaria la re-inizializzazione delle ambiguità. Il confronto diretto delle coordinate ottenute dall'analisi degli osservabili rover-master e rover-pillar permette di individuare gli intervalli temporali in cui i dati non sono attendibili.

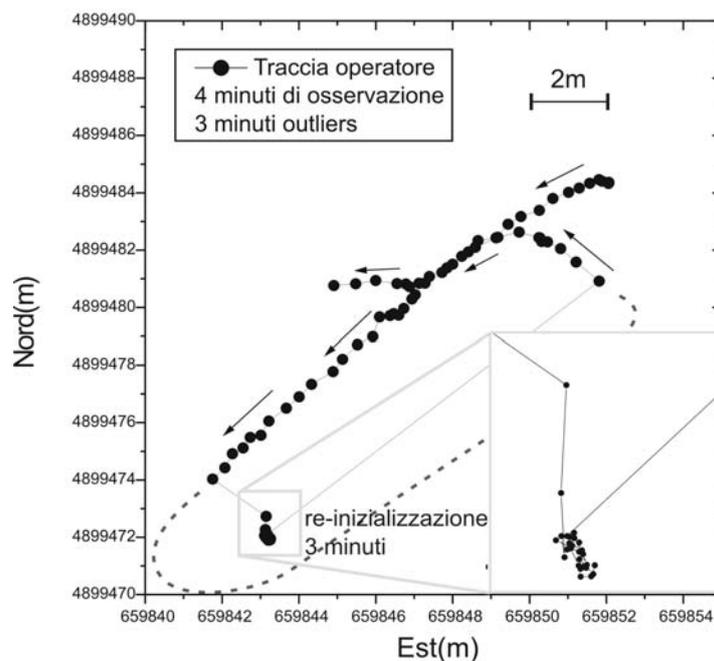


Fig. 13 Viene evidenziato, nel sistema cartografico UTM (dalle coordinate geocentriche WGS84), la traccia dell'operatore prima, durante e dopo la perdita di segnale e conseguente re-inizializzazione: per un intervallo di tempo di circa 3 minuti le coordinate non rappresentano realmente la superficie della frana.

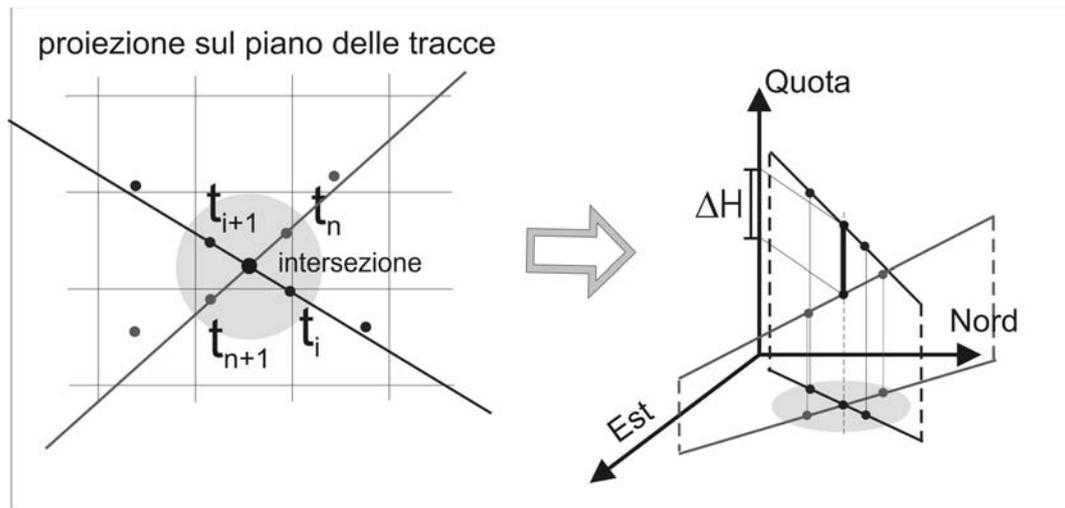


Fig. 14 Rappresentazione grafica dell'analisi di cross-over. La traccia dell'operatore è interpolata tra due epoche successive mediante una retta e l'intersezione tra 2 tracce indipendenti viene calcolata sul piano; la differenza tra i valori in quota corrispondenti al punto comune di intersezione viene interpretata come residuo.

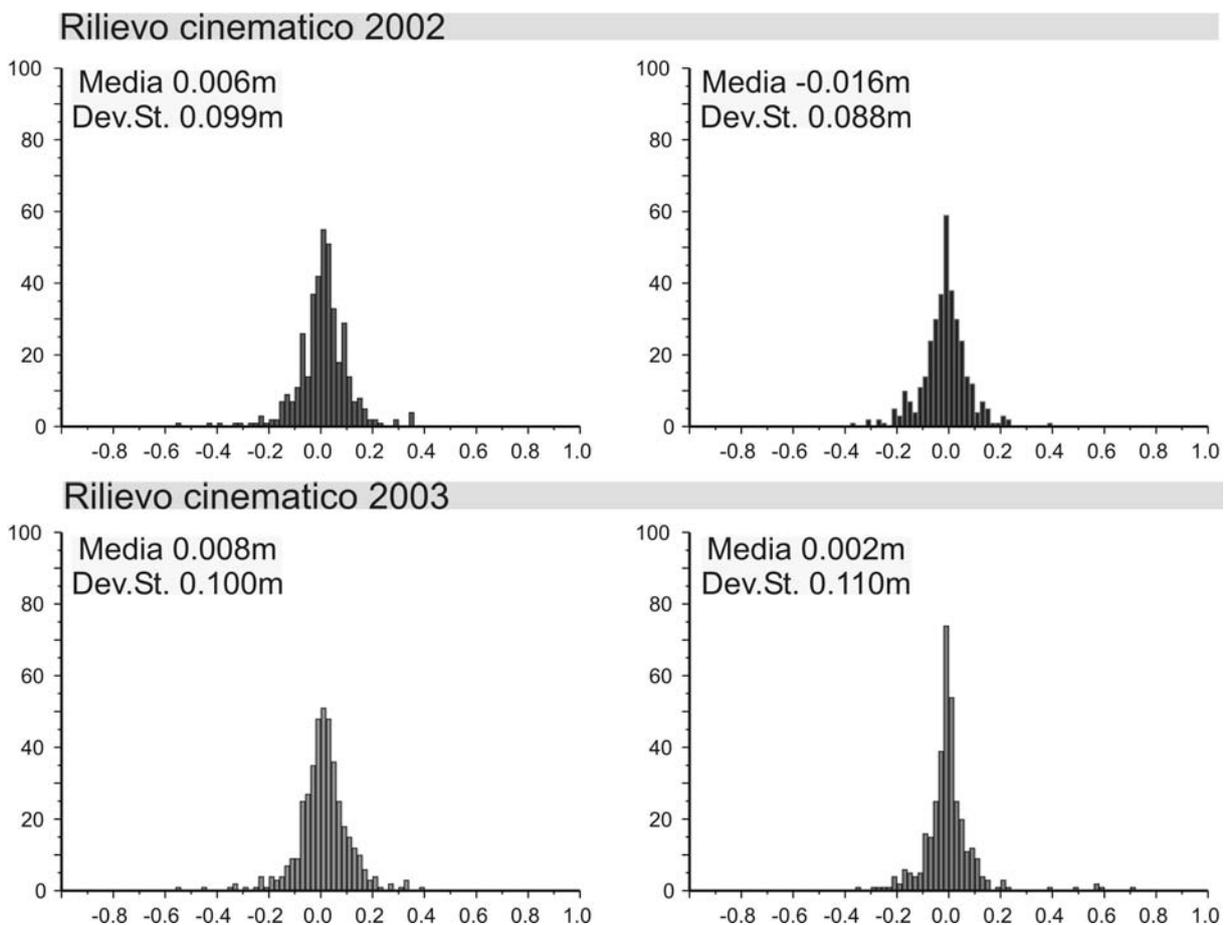


Fig. 15 Risultati delle analisi di cross-over effettuate sui rilievi cinematici del 2002 e 2003. I valori delle medie e deviazioni standard confermano la validità del modello cinematico la cui precisione interna risulta essere di circa 10 cm. Le quattro distribuzioni si riferiscono ai valori delle coordinate ottenute dall'analisi delle osservazioni rover-MAST e rover-PILL.

ed a basso costo, e permettono di effettuare monitoraggio frequente di aree instabili.

Rilievi fotogrammetrici

L'evoluzione morfologica nel tempo della frana è stata analizzata a partire dal 1976,

utilizzando quattro rilievi fotogrammetrici aerei effettuati nel maggio del 1976, nel settembre del 1986, nell'agosto del 1988 e nel maggio del 1993.

In questi casi i voli sono a piccola scala per cui tutta l'area interessata dalla frana si trova in una singola stereocoppia (Fig. 16); la scansione dei fotogrammi è stata effettuata mediante

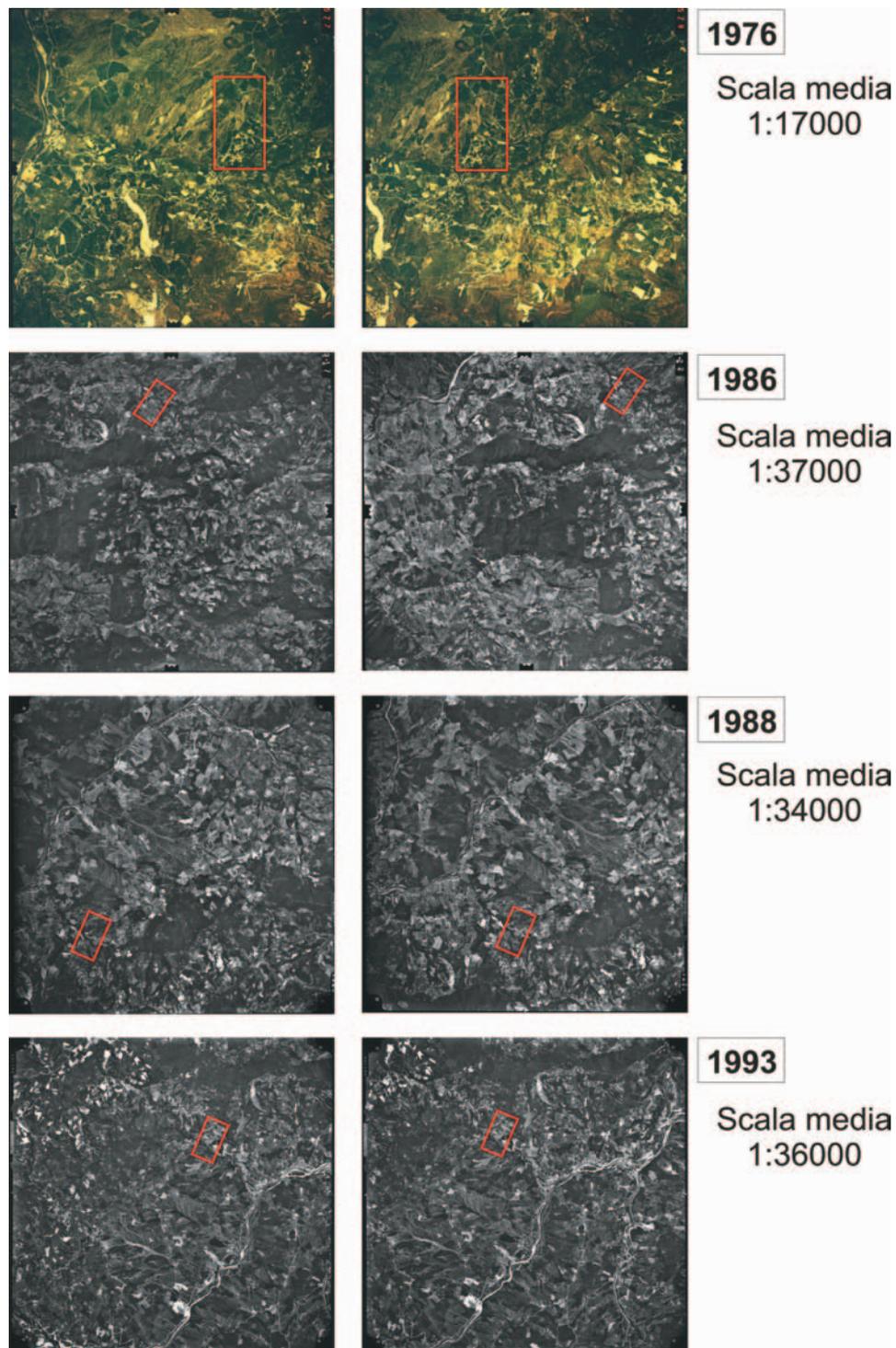


Fig. 16 Coppie di fotografie aeree scelte ed utilizzate per l'elaborazione in stereoscopia: il box indica l'area della frana studiata.

Caratteristiche	1976	1986	1988	1993
Camera	RMK A 15/23	RMK A 15/23	RC 10	RC 20
Quota di volo (m)	2552	5750	5236	5617
Colore – b/n	Colore	b/n	b/n	b/n
Scala media fotogrammi	1:17000	1:37000	1:34000	1:36000

Tab. 2 Caratteristiche dei rilievi fotogrammetrici utilizzati.

l'utilizzo dello scanner fotogrammetrico Wehrli Raster Master RM2 a 12 μm (2116 dpi) fornendo una risoluzione a terra che varia da 20 a 45 centimetri.

Le caratteristiche principali dei rilievi fotogrammetrici sono mostrate in tabella 2.

Per l'analisi dei dati è stata utilizzata la stazione fotogrammetrica DPW 770 Helava (software Socet Set) (LH Systems, 1999). L'orientamento delle immagini è stato effet-

di dissesto per ottenere l'unicità del sistema di riferimento e poter confrontare i modelli digitali prodotti dai diversi rilievi. L'estrazione automatica dei modelli (Fabris, 2004) ha interessato non solo la zona della frana ma anche l'area circostante (Fig. 18), che comprende l'intero bacino idrografico.

È stato necessario 'editare', cioè correggere manualmente sul modello, le zone di scarsa correlazione (mediamente il 30-40% del totale) e



Fig. 17 Particolare di una fotografia: il mirino individua lo spigolo di un piccolo casotto scelto come punto di controllo.

tuato, per i quattro modelli, nello stesso sistema di riferimento: sono stati infatti scelti sulle immagini stesse 21 punti naturali (spigoli di marciapiedi, di tetti, spalle di ponti, ecc...), esterni all'area di frana, ben visibili sulle immagini, e misurati con metodologia GPS.

Questi sono stati utilizzati come punti fotografici d'appoggio (Fig. 17).

È di fondamentale importanza che i punti naturali utilizzati per la creazione del modello fotogrammetrico siano in aree stabili, non interessate da fenomeni deformativi o

le zone coperte da vegetazione; in tabella 3 sono evidenziate le caratteristiche principali dei dati ottenuti dai quattro modelli fotogrammetrici.

I modelli ottenuti in seguito alle operazioni di 'editing' e considerati nello stesso sistema di riferimento, sono stati confrontati direttamente per valutare l'affidabilità della metodologia. Il confronto è stato effettuato a partire dal modello digitale del terreno del 1993 (di riferimento).

In questa prima fase è stata considerata un'area che comprende solo le zone circostanti la frana (~288000 punti), evitando le aree con densa vegetazione (Fig. 19).

Caratteristiche	1976	1986	1988	1993
Numero punti fotografici d'appoggio	9	7	9	10
Risoluzione immagini (dpi)	2116	2116	2116	2116
Dimensione pixel su immagini (μm)	12	12	12	12
Dimensione pixel a terra (cm)	20	45	41	44
Passo griglia DEM (m)	1	1	1	1
Numero punti DEM	2504166	1413192	2230452	2513332

Tab. 3 Caratteristiche dei modelli digitali ottenuti dall'elaborazione delle immagini fotogrammetriche: il modello relativo all'anno 1976 (da fotografie a colori) è il più preciso, con una dimensione del pixel a terra di 20 cm.

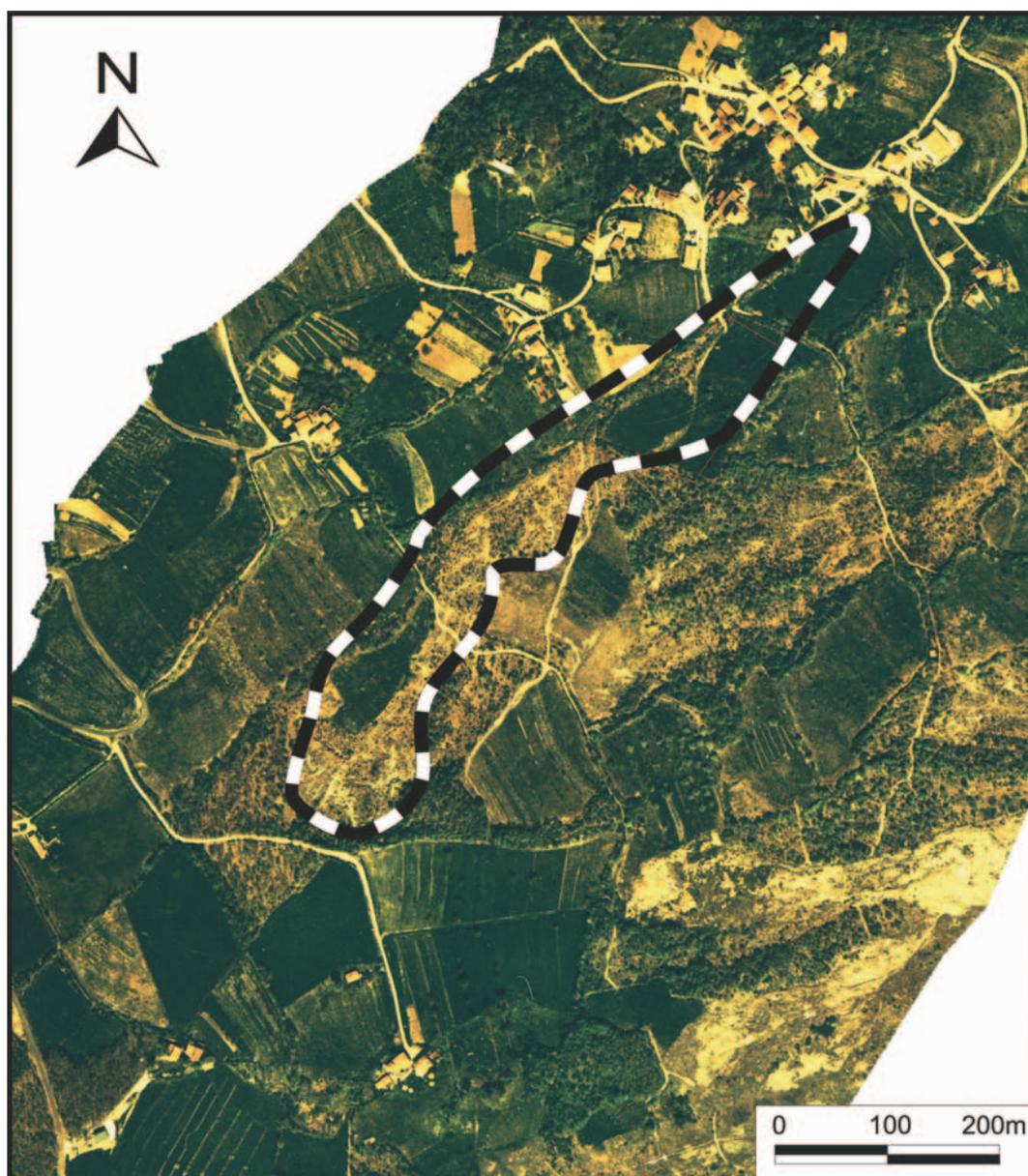


Fig. 18 Area di frana (limitata dalla linea tratteggiata) ed esterna alla frana su cui è stato creato il modello digitale.

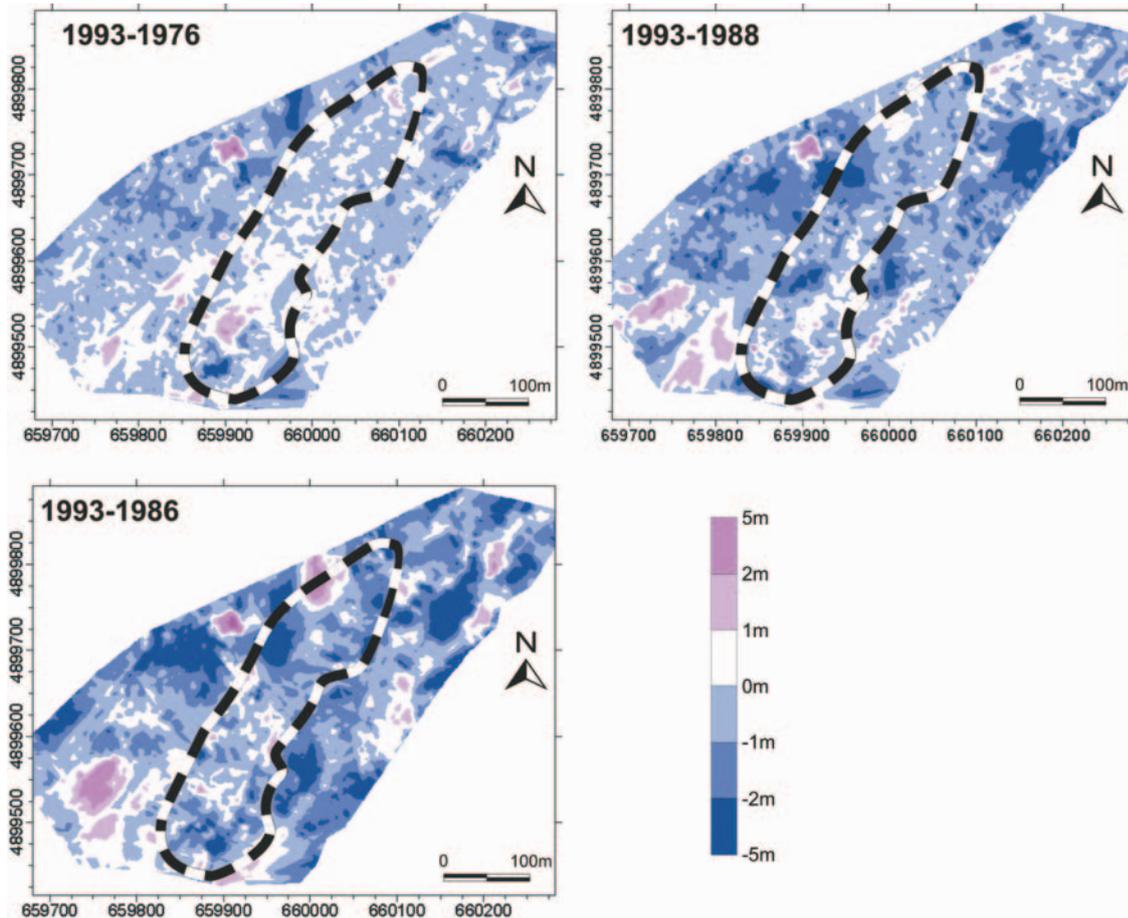


Fig. 19 Confronto diretto tra DEM registrati nello stesso sistema di riferimento.

Come evidenziato dalla tabella 4, i valori della media e della deviazione standard dei residui derivanti dal confronto tra i 4 modelli sono compresi tra 0.32-0.74 metri e 0.69-1.12 metri rispettivamente, confermando la bontà della metodologia anche in considerazione del fatto che la scala delle immagini fotogrammetriche consente la valutazione di deformazioni submetriche solo nel rilievo del 1976.

a scansione sono state realizzate nella parte alta della frana per ottenere modelli ad alta precisione della zona di nicchia.

Gli strumenti utilizzati (Fig. 20), le cui caratteristiche sono riportate in tabella 5, sono il LM S-Z210 ed il LMS-Z410 (Riegl Laser Measurement Systems GmbH), ed il ILRIS-3D (Optech incorporated) corredati rispettivamente dai software RiscanPro (per Riegl 3D

Confronti tra DEM	Media (m)	Dev.St. (m)
1993-1976	-0.32	0.69
1993-1986	-0.74	1.12
1993-1988	-0.64	0.89

Tab. 4 Confronto diretto tra DEM registrati nello stesso sistema di riferimento. Sono state calcolate le medie dei residui in quota e le rispettive deviazioni standard: il modello di riferimento è quello relativo al volo del 1993.

Rilievi con laser a scansione

Nel giugno 2002, dicembre 2003 e aprile 2004 tre campagne di rilievo mediante laser

laser scanners) e Polyworks (InnovMetric).

La differenza più evidente tra i due tipi di strumenti laser è la portata massima di lavoro ed i valori angolari del campo di scansione:



Fig. 20 I tre strumenti laser scanner utilizzati nelle campagne di misura: il primo modello, ILRIS-3D è dotato di computer interno, interfaccia grafica incorporata ed è gestito mediante un palmare; i modelli LMS-Z210 e LMS-Z410 sono gestibili mediante collegamento ad un PC portatile e consentono di effettuare il rilievo e parte di analisi dati direttamente sul campo.

Caratteristiche	LMS-Z210	LMS-Z410	ILRIS-3D
Portata massima ($\rho=80\%$)	400 m	800 m	2000 m
Portata massima ($\rho=10\%$)	120 m	250 m	700 m
Portata minima	4 m	2 m	3 m
Accuratezza sulla singola misura	25 mm	10 mm	7 mm
Accuratezza sulla media	15 mm	5 mm	2.6 mm
Velocità campionamento	8000 pts/sec	8000 pts/sec	2000 pts/sec
Campo di scansione	80° x 360°	80° x 360°	40° x 40°
Lunghezza d'onda	Infrarosso vicino	Infrarosso vicino	Infrarosso vicino
Divergenza raggio a 100 m	30 cm	2.5 cm	2.9 cm
Minimo passo angolare	0.005°	0.0025°	0.0015°
→ (a 100 m)	87 mm	4.4 mm	2.6 mm

Tab. 5 Caratteristiche tecniche e precisioni delle strumentazioni LMS-Z210, LMS-Z410 e ILRIS-3D. La portata massima (cioè la massima distanza da cui è possibile effettuare un rilievo) è strettamente legata alle proprietà di riflettività delle superfici rilevate e viene data all'80% (es: roccia chiara) ed al 10% (es: asfalto). La portata minima dipende dall'elettronica interna e cioè dalla capacità di misurare un tempo minimo di volo. L'accuratezza sulla singola misura indica l'errore sull'analisi di un singolo impulso di ritorno mentre l'accuratezza sulla media si riferisce all'errore statistico che si ottiene dal sovra-campionamento di una superficie (valori ottenuti rilevando un'area piana). La divergenza del raggio indica la dimensione della superficie illuminata dal raggio a 100 m di distanza. Il minimo passo angolare è un parametro legato alla meccanica dello strumento e cioè al sistema di specchi rotanti ed oscillanti che deflettono il raggio secondo precise direzioni: questo valore, trasformato in lunghezza, indica la variazione di posizione minima ottenibile da una distanza di 100 m.

nel primo caso è possibile scansire l'intera area da uno stesso punto di stazione grazie ad un sistema meccanico che permette una rotazione orizzontale di 360° ed una verticale di 80° ; nel secondo caso ($40^\circ \times 40^\circ$) può essere necessario effettuare acquisizioni multiple da punti differenti. Tutto ciò dipende dal fatto che il Riegl è nato per scopi architettonici, mentre l'ILRIS 3D è stato progettato per rilievi ambientali; con portate di 800 o 1000 metri ed un angolo di vista di $40^\circ \times 40^\circ$, l'area rilevata risulta sufficientemente grande.

È importante considerare che la portata massima è influenzata dalle caratteristiche di

superficie colpita da un impulso laser, i centri individuano il passo angolare nel percorso longitudinale ed i cerchietti rossi rappresentano la posizione in uno spazio 3D di un oggetto contenuto nell'area illuminata: ad ogni ritorno del segnale viene calcolato il tempo di volo e quindi una posizione nel sistema relativo.

Lo strumento LMS-Z210 utilizzato nella campagna di rilievo del 2002, pur appartenendo ad una generazione già superata, ha comunque le caratteristiche utili agli scopi di monitoraggio presentato in questo lavoro.

Nelle figure 23 e 24 (a,b) sono mostrati

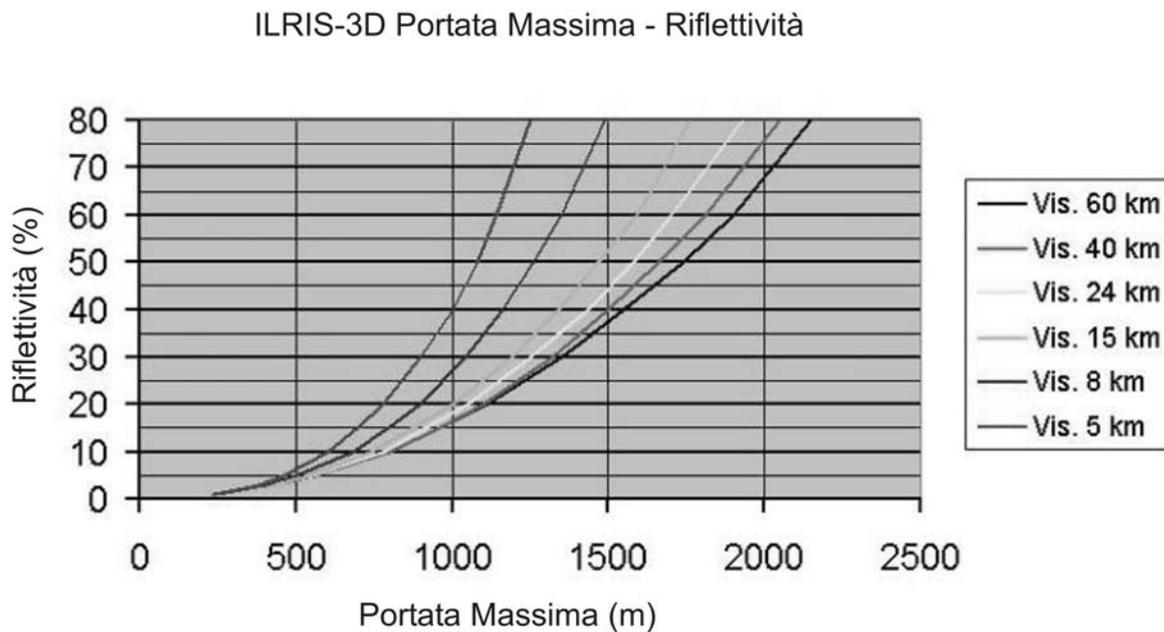


Fig. 21 Strumento ILRIS-3D: portata massima in funzione della riflettività ed in base alla visibilità dovuta alla situazione atmosferica.

retrodiffusione dei materiali e dalle condizioni di visibilità. Superfici bagnate e nebbia per esempio ne decrescono notevolmente il valore. La figura 21 mostra la portata massima dello strumento ILRIS-3D utilizzando bersagli con diversa riflettività ed in differenti situazioni atmosferiche.

La dimensione dello spot, e cioè della porzione di terreno illuminata dal raggio laser che, come indicato in tabella 5, ha una certa divergenza, non limita la risoluzione del prodotto finale; questa infatti è maggiormente legata alla risoluzione angolare, che permette di acquisire misure sovrapposte (overlapping) e di aumentare in modo significativo la precisione sulla singola misura.

Questo concetto è brevemente illustrato in figura 22, dove i cerchi rappresentano la

gli schemi dei rilievi effettuati nel giugno 2002 (LMS-Z210) e nel dicembre 2003 (ILRIS-3D); i dati della campagna di Aprile 2004 (LMS-Z410) sono attualmente in fase di elaborazione.

La nuvola di punti laser ottenuta da ogni rilievo è un insieme di coordinate 3D, date nel sistema di riferimento interno dello strumento, a cui è associato anche un valore di riflettività. Per ottenere un modello tridimensionale completo occorre quindi concatenare le differenti scansioni, mediante operazioni di roto-traslazione, allineandole e registrandole in uno stesso sistema di riferimento: questo avviene mediante la scelta di punti naturali o target artificiali, chiaramente riconoscibili nelle scansioni (Fig. 25).

Nei rilievi effettuati, sono stati utilizzati

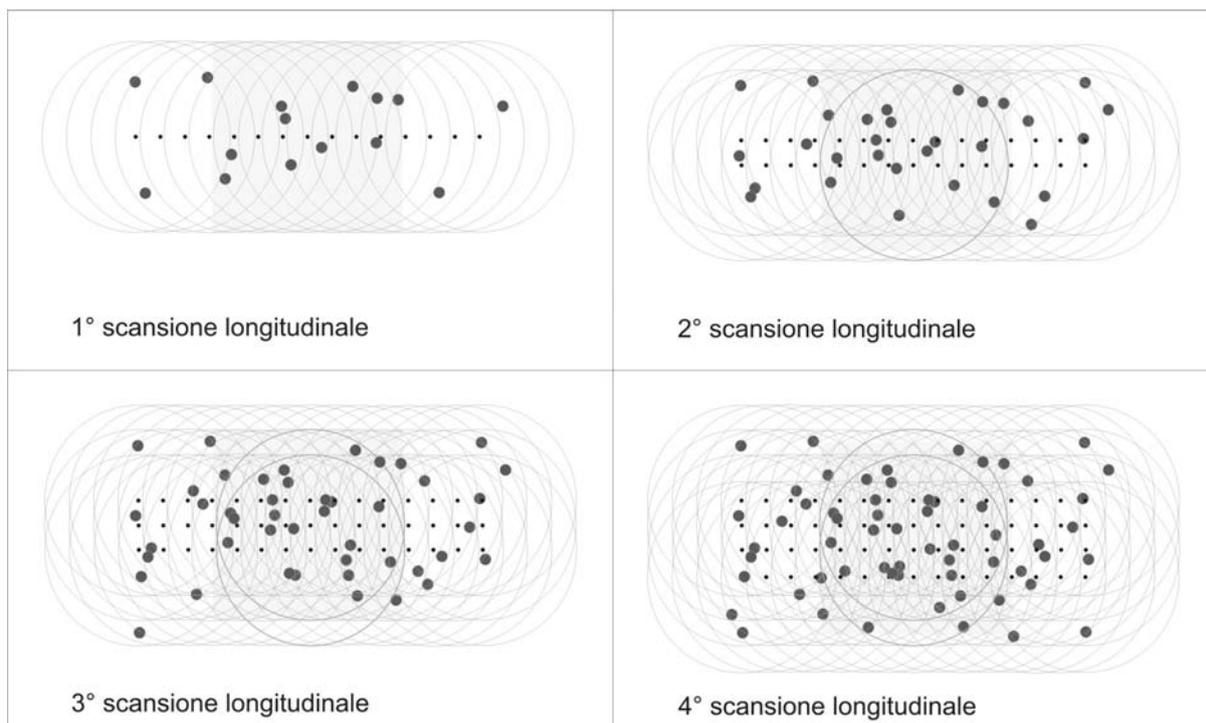


Fig. 22 Overlapping: supponendo di rilevare una superficie verticale, dove i cerchi rappresentano esattamente l'area illuminata dal raggio laser ad una distanza definita ed i loro centri (cioè i puntini neri che nelle fasi successive formeranno una griglia regolare) indicano il passo angolare, l'elemento della superficie responsabile del primo arrivo al telemetro, in seguito alla riflessione, è indicato con un pallino rosso. L'alta densità di punti rilevati consente, grazie ad opportune operazioni di ricampionamento, di calcolare la media delle misure diminuendo sensibilmente l'errore (che è inversamente proporzionale alla radice del numero di prove).

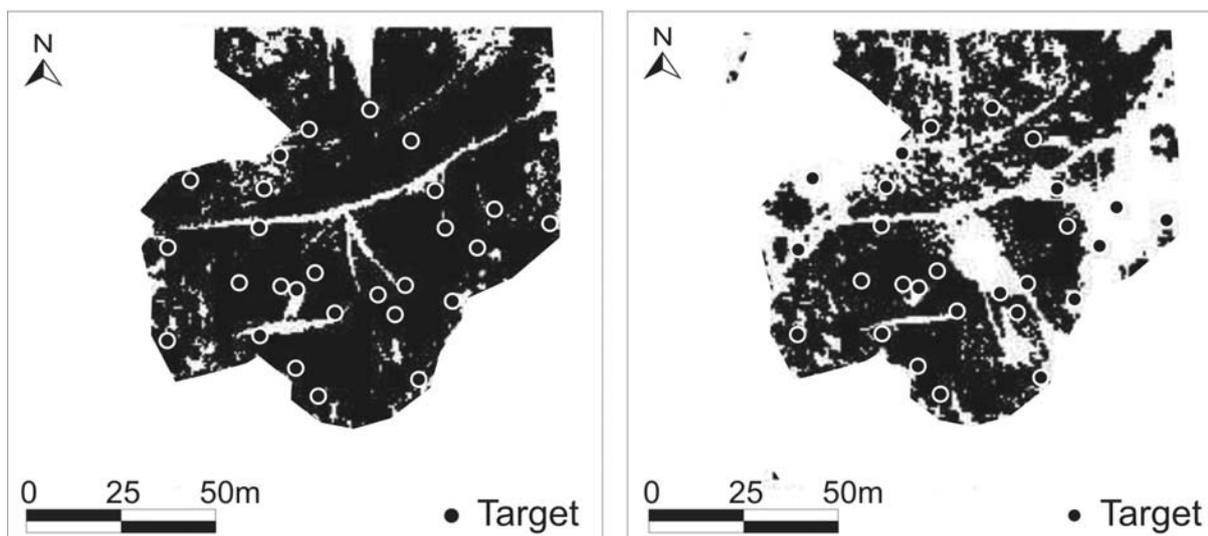


Fig. 23 Primo rilievo Laser Scanner (giugno 2002). Sono state effettuate due scansioni con il LMS-Z210 rilevando la superficie nella zona di nicchia mediante una rotazione quasi completa del sistema ottico sull'asse orizzontale. Nella figura di sinistra è visibile il punto di stazione dello strumento che non compare invece nella figura di destra poiché esterno all'area selezionata: le zone bianche mostrano una mancanza di dati causata dalle ombre, cioè le zone non raggiunte dal raggio laser a causa della morfologia e del punto di acquisizione.

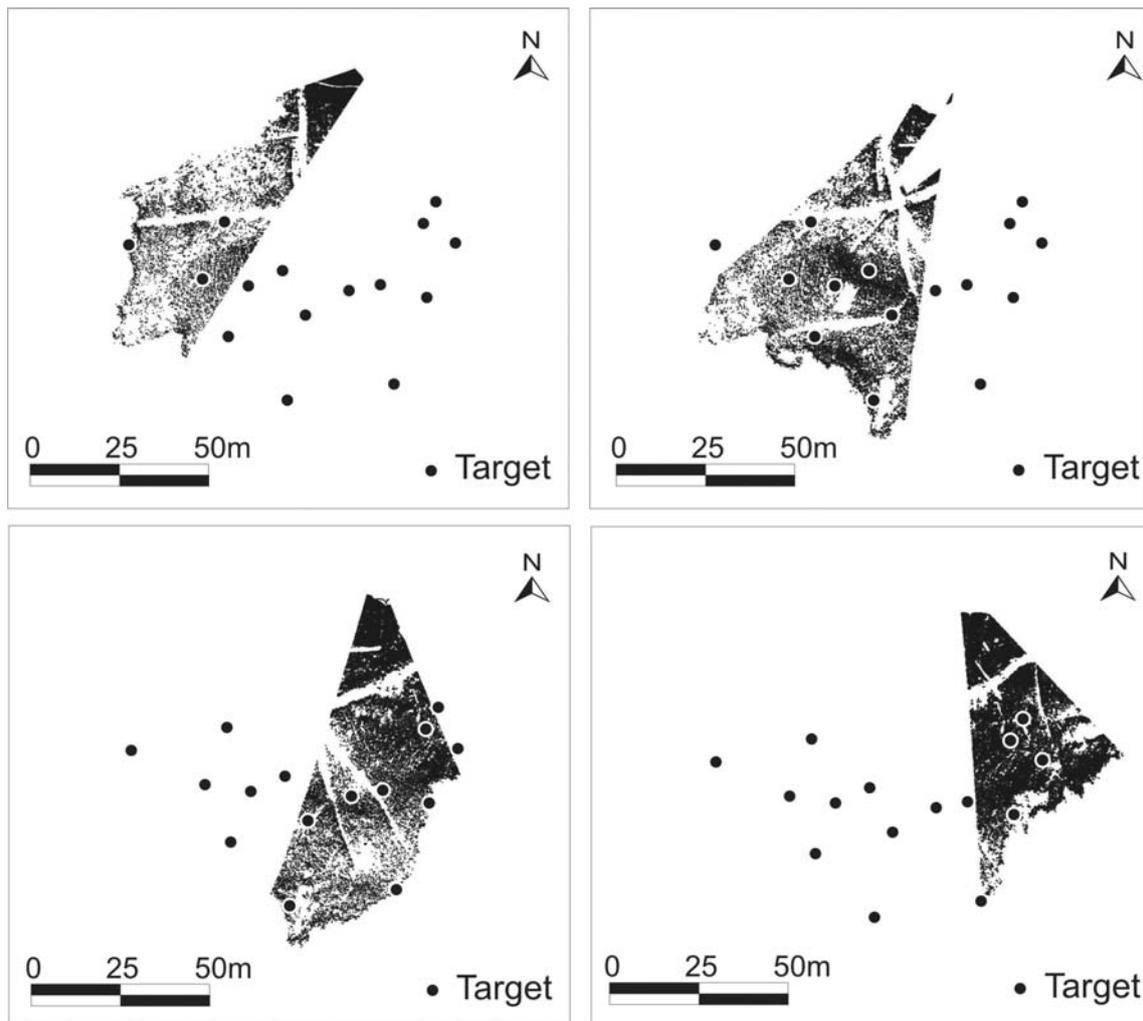


Fig. 24a Secondo rilievo Laser Scanner (dicembre 2003). Sono state effettuate quattro scansioni da punti di stazione posti nella parte bassa della zona di nicchia con una sovrapposizione media del 30%.

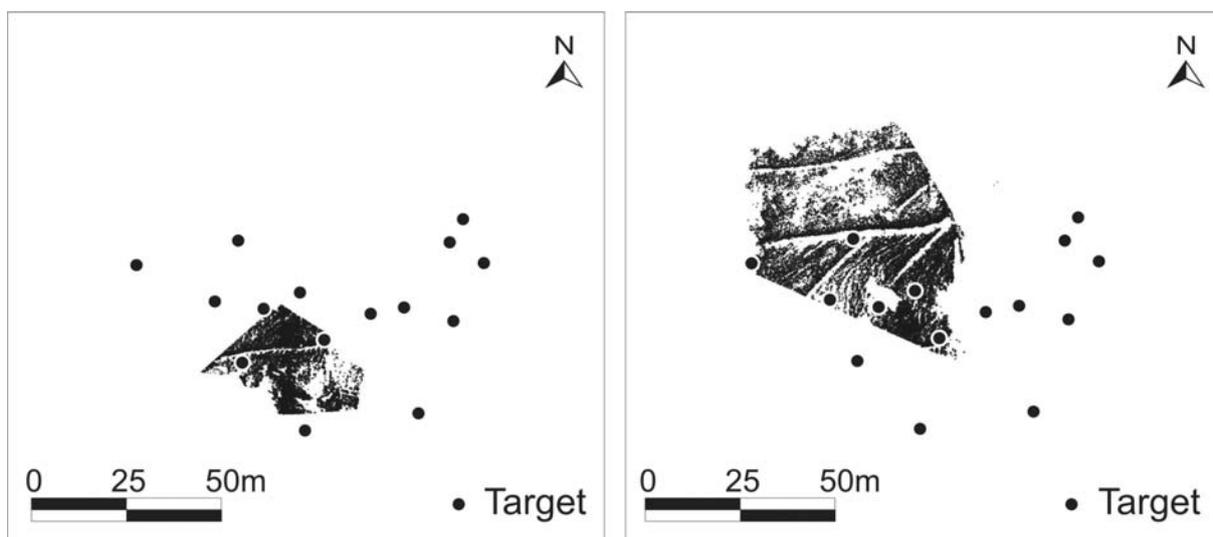


Fig. 24b Secondo rilievo Laser Scanner (dicembre 2003). Altre due scansioni, effettuate da punti di stazione posizionati in una parte alta della nicchia, sono state aggiunte nel tentativo di limitare le zone di ombra.

due tipi di target differenti sia per le caratteristiche di retro-diffusione che per dimensioni fisiche e geometria.

Nel rilievo di giugno 2002, sono stati montati sui picchetti dei cubi di 6 cm di lato, ricoperti di carta riflettente e forati in modo tale che la testa del picchetto coincidesse con il centro del cubo. Nel dicembre 2003, sono stati usati dei pannelli quadrati di 50 cm di lato ricoperti di carta nera e con un cerchio bianco

e ben visibile nel centro: anche in questo caso, sono stati posizionati in modo tale che il centro del target coincidesse con la testa del picchetto (fig. 26).

Il livello di dettaglio che si ottiene dai rilievi laser è mostrato nella figura seguente: l'insieme dei punti tridimensionali è rappresentato con una colorazione che mette in risalto una illuminazione verde dall'angolo sinistro inferiore e violetta dall'angolo destro superio-

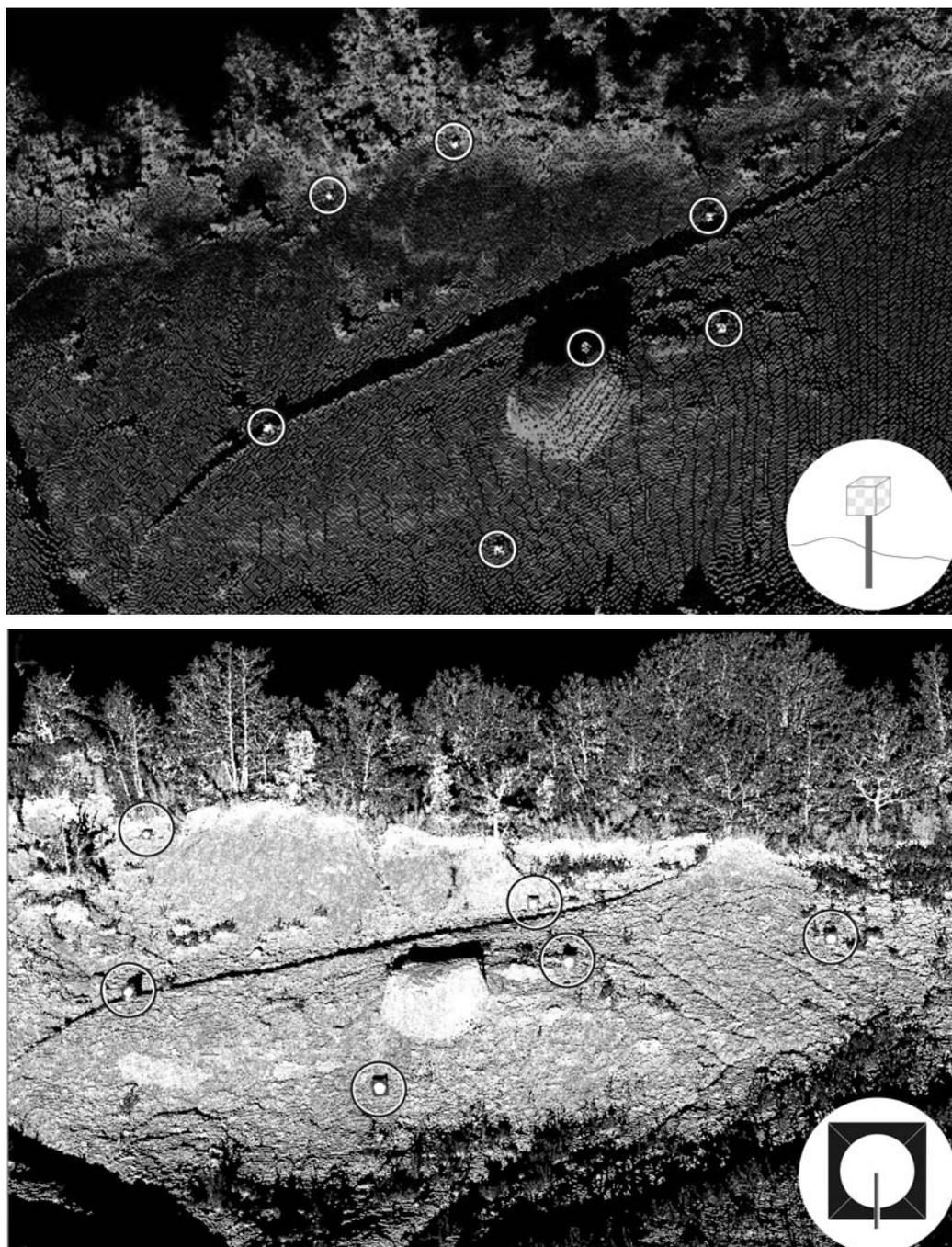


Fig. 25 Particolare dei due rilievi laser. Le immagini si riferiscono ad una porzione di superficie nella quale si possono individuare i target utilizzati per l'unione delle scansioni: nelle nuvole di punti sono chiaramente visibili i canali di drenaggio, i massi inglobati nel corpo di frana, la vegetazione; la risposta degli oggetti rilevati in termini di riflettività è indicata dall'intensità di grigio.

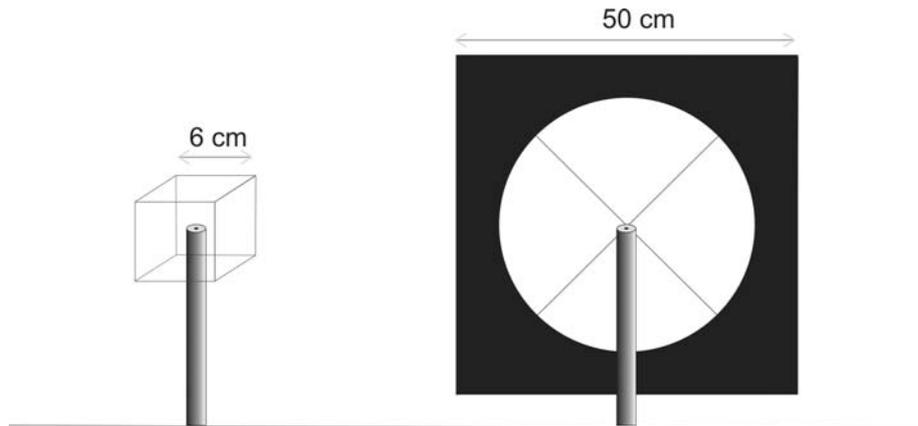


Fig. 26 Target utilizzati rispettivamente nei rilievi di giugno 2002 e dicembre 2003. Nel primo caso si tratta di cubetti di lato 6 cm e ricoperti da carta riflettente, mentre nel secondo caso sono stati utilizzati dei pannelli di forma quadrata e pochi millimetri di spessore coperti di carta nera e con un cerchio bianco al centro (per creare un forte contrasto nella contenuto energetico della risposta).

re. Le caratteristiche morfologiche dell'area in esame sono ben visibili e i canali di drenaggio, la vegetazione, i target, il masso e la parte alta maggiormente dissestata sono evidenziati con chiarezza (Fig. 27).

La generazione del modello finale è stato ottenuto mediante un procedimento di registrazione di coppie di scansioni sommando

al modello parziale la scansione successiva: per l'unione di differenti scansioni sono stati utilizzati i target prima citati come punti "omologhi" rilevati in entrambe le prese laser la cui posizione è nota nei rispettivi sistemi di riferimento.

Vengono successivamente calcolati i sei parametri di orientamento (3 parametri di rota-

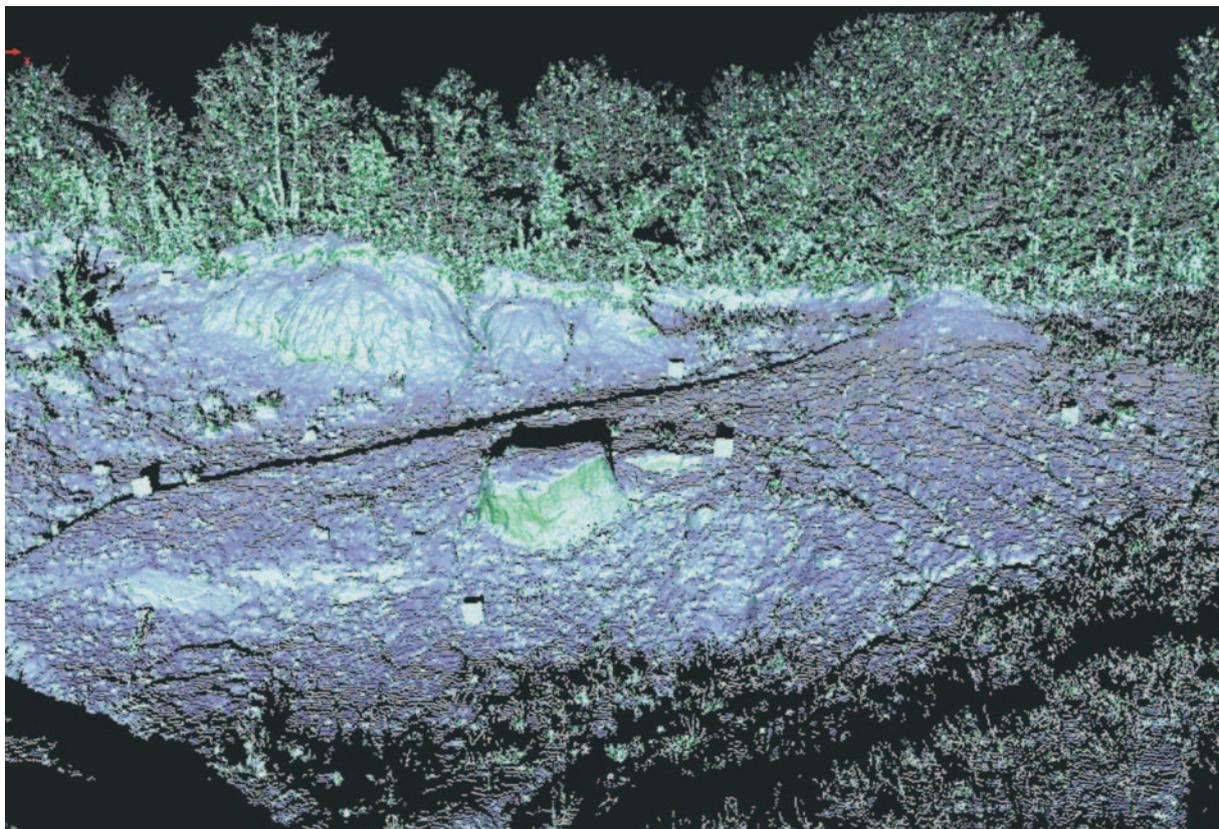


Fig. 27 Nuvola di punti acquisiti con ILRIS-3D: i dati sono rappresentati con una colorazione opportuna. Il livello di dettaglio raggiungibile permette di mettere in evidenza la morfologia della frana.

zione attorno agli assi x, y, z e tre parametri di traslazione spaziale) e generare la matrice di roto-traslazione tra i differenti sistemi. Tale matrice viene successivamente applicata a tutti i punti della scansione rototraslata rispetto alla scansione di riferimento.

L'applicazione di questo procedimento ad ogni singola scansione permette la creazione del modello completo dell'area in esame ed è utilizzata dalle routine presenti nei programmi di calcolo.

La differente modalità di rilievo necessita di approcci di processamento differenti ed idonei: le sei scansioni eseguite nel dicembre 2003 sono state registrate tramite il software Polyworks (InnovMetric) che utilizza algoritmi di correlazione di forme (ICP) mediante la ricerca automatica di tutte le aree "omologhe" nelle zone di sovrapposizione tra le immagini (Bergevin et al., 1996): la deviazione standard ottenuta (5 mm) è sempre stata inferiore all'accuratezza del singolo punto laser (7 mm).

Per utilizzare i modelli creati in un sistema integrato multitemporale è stato necessario registrarli in un comune sistema di riferimento. Per tale operazione i punti di controllo artificiali sono stati misurati mediante rilievi GPS in modalità rapido-statica che hanno fornito le coordinate cartesiane dei punti, all'epoca del rilievo con precisioni sub-centrimetriche. Mediante operazioni di rototraslazione i modelli laser a scansione sono stati così orientati in un unico sistema (cartografico UTM, WGS84).

Nella tabella 6 sono presentati i residui delle operazioni di rototraslazione.

Durante la campagna di rilievo di dicembre 2003 solo un piccolo numero di target è stato impiegato per la georeferenziazione e per il controllo sui residui rispetto alla misura GPS, in quanto solo questi sono stati riposizionati durante l'esperimento con tecnica GPS.

L'operazione di registrazione in un sistema globale mediante punti di controllo artificiali è un passo estremamente delicato che richiede molta attenzione durante la campagna di misura; un errore di posizionamento del target, che solitamente corrisponde ad un offset in quota, può infatti distorcere la geometria dell'intero sistema. La famiglia di curve mostrata in figura 28, relativa ad una variazione fissa di 1cm della linea di base su distanze planimetriche che variano tra 10 m e 100 m, mette in evidenza che, in situazione di forte dislivello, la sensibilità rispetto ad un errore di posizionamento verticale è elevata.

LMS-Z210				
p.to	$\Delta E(m)$	$\Delta N(m)$	$\Delta H(m)$	Scarto(m)
PI19	-0.047	0.054	0.027	0.077
PI17	-0.023	0.029	0.015	0.040
PI20	-0.022	0.019	0.012	0.031
PI18	-0.019	0.018	0.017	0.031
PI12	-0.018	-0.080	-0.006	0.082
PI07	-0.015	-0.012	0.020	0.028
PI02	-0.012	-0.023	-0.019	0.032
PI06	-0.001	0.015	-0.008	0.017
PI10	0.001	0.004	-0.026	0.026
PI05	0.002	-0.004	-0.001	0.005
PI13	0.006	-0.082	-0.022	0.085
PI08	0.010	-0.020	0.021	0.031
PI15	0.021	0.017	-0.009	0.028
PI11	0.024	0.011	-0.002	0.026
PI09	0.042	0.041	0.005	0.059
PI16	0.052	0.014	-0.022	0.058
ILRIS-3D				
p.to	$\Delta E(m)$	$\Delta N(m)$	$\Delta H(m)$	Scarto(m)
PI03	-0.008	-0.021	0.002	0.023
PI08	0.032	0.010	0.004	0.034
PI13	-0.022	-0.002	0.012	0.025
PI15	-0.009	0.005	-0.013	0.017
PI17	0.008	-0.001	-0.006	0.010
PILL	-0.001	0.009	0.001	0.009

Tab. 6 Risultato delle operazioni di georeferenziazione mediante target: residui fra le coordinate laser e le coordinate GPS dopo la rototraslazione. Nell'ultima colonna è riportato il valore assoluto dello scarto tra i punti in questione. H indica la quota ellissoidica di riferimento WGS84.

Confronto tra DEM

I prodotti finali ottenuti mediante l'applicazione delle tecniche precedentemente descritte sono modelli digitali del terreno georeferenziati nello stesso sistema di riferimento. I valori indicati nei grafici e nelle figure si riferiscono

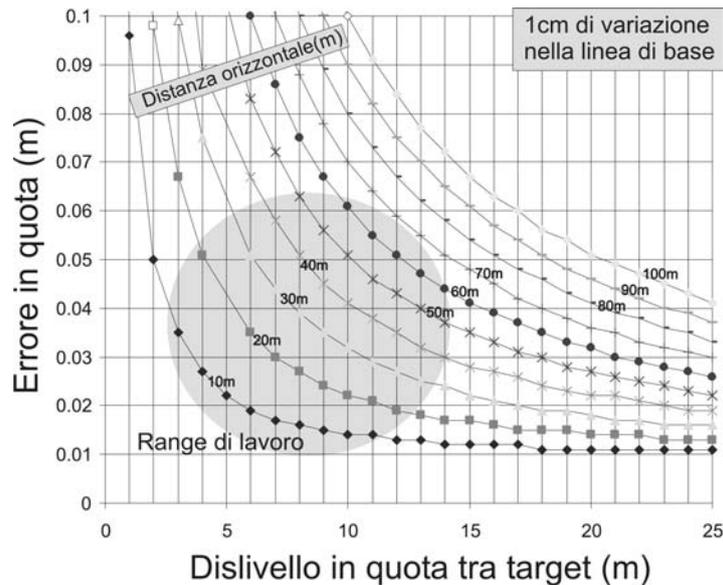


Fig. 28 Influenza di un errore di posizionamento in quota del target sulla geometria interna del sistema in base alla distanza planimetrica e al dislivello in quota: la variazione di 1 cm della linea di base tra i centri di due target, posti ad una distanza orizzontale di 30 m con un dislivello di 6 m, per esempio, è causata da un offset verticale di 5 cm; la stessa variazione, in una configurazione in cui il dislivello sia di 20 m, è causata invece da un offset inferiore ai 2 cm. Nel grafico, il cerchio grigio rappresenta la zona di lavoro.

no al sistema cartografico UTM (datum WGS84).

Il risultato dell'elaborazione del dato GPS cinematico è costituito da un insieme di coordinate tridimensionali di punti della superficie fisica irregolarmente distribuiti con densità media di 1 punto per metro quadro. L'estrazione di punti dalla stereocoppia fotogrammetrica fornisce le coordinate 3D su una griglia regolare con passo pre-definito dall'operatore e comunque superiore alla minima risoluzione (dimensione del pixel a terra). Il rilievo laser scanner produce una nuvola di punti ad alta densità ed irregolarmente distribuiti.

Per confrontare le diverse superfici è stato necessario produrre anche, dai dati GPS e laser a scansione, delle griglie regolari tramite interpolazione con algoritmi geostatistici (per esempio kriging).

La tecnica di kriging è particolarmente adatta poiché è basata sulla costruzione di un variogramma ottenuto inizialmente mediante i dati sperimentali e raffinato in seguito per ottenere la funzione teorica che lo rappresenta al meglio (Abramowitz, 1972; Cressie, 1990; Cressie, 1991).

Utilizzando tale metodo di interpolazione è possibile costruire un modello su griglia regolare che sia il più rappresentativo possibile del dato rilevato: il calcolo della quota su ogni nodo della griglia viene infatti eseguito utilizzando una funzione realistica, ottenuta diretta-

mente dalla distribuzione dei dati sperimentali, per pesare correttamente i punti sparsi sulla superficie fisica nelle vicinanze del nodo stesso. Coerentemente con le risoluzioni dei modelli fotogrammetrici, in questo lavoro abbiamo generato griglie con passo di 1 metro, valore molto superiore alla precisione del singolo dato distribuito sulla superficie di frana sia in considerazione del rilievo laser scanner (precisione centimetrica) che del GPS cinematico (circa 10 cm di precisione). Inoltre la densità dei punti misurati in entrambi i casi è assai maggiore di 1 punto per metro quadro e perciò è lecito supporre che il degrado della precisione, dovuto alle operazioni di modellazione, sia trascurabile.

Il primo confronto (Fig. 29) è stato effettuato fra i modelli fotogrammetrici del 1976 e 1993: non sono state rilevate variazioni significative nel corpo di frana mentre, nell'area di nicchia, è evidente una perdita di massa nella parte superiore con relativo accumulo sottostante.

Il secondo confronto (Fig. 30), tra il rilievo fotogrammetrico del 1993 ed il modello ottenuto nel 2003 tramite GPS cinematico, mostra una chiara deformazione solo nella parte nord-ovest del corpo di frana. Nonostante le informazioni riportate in letteratura confermino che una riattivazione è avvenuta proprio nell'intervallo di tempo in esame, gli elevati valori di perdita di massa e la loro localizzazione, fanno supporre che i residui mostrati in figura

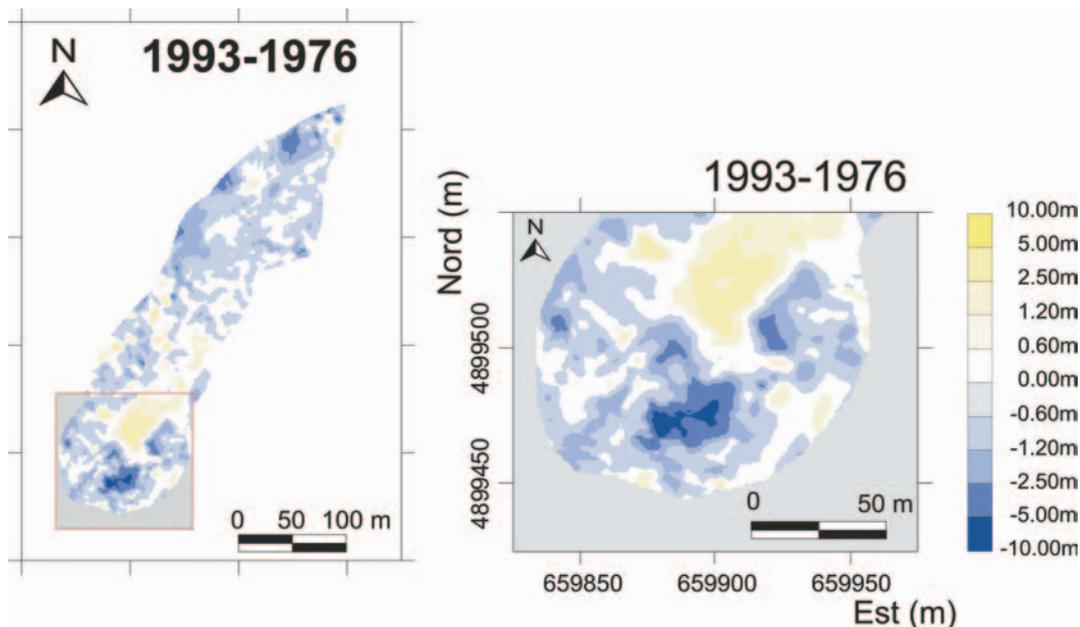


Fig. 29 Confronto tra i modelli fotogrammetrici derivati dai rilievi effettuati nel 1976 e 1993.

siano in parte dovuti ad importanti opere di consolidamento effettuate nel 2002.

A conferma dei risultati ottenuti dalle analisi precedenti, può essere utile confrontare il modello digitale fotogrammetrico relativo al 1976, ricavato da un volo effettuato a bassa quota, e accuratezza interna valutabile 0.5 m con il rilievo GPS del marzo 2003 (di accuratezza decimetrica). Viene effettuato il confronto tra le due estremità dell'intervallo temporale disponibile in quanto, a causa della scala media

delle immagini, non è possibile valutare con certezza variazioni inferiori al metro: in questo intervallo di tempo non si sono presentati fenomeni deformativi particolarmente rilevanti e quindi, in questo modo, vengono evidenziate solo le variazioni più marcate. Nella figura 31 appaiono evidenti i canali di drenaggio ed è confermata la variazione morfologica descritta nel confronto 1976-1993. Questo risultato è una ulteriore conferma del fatto che tra il 1993 ed il 2003 non sono avvenute modificazioni rilevanti

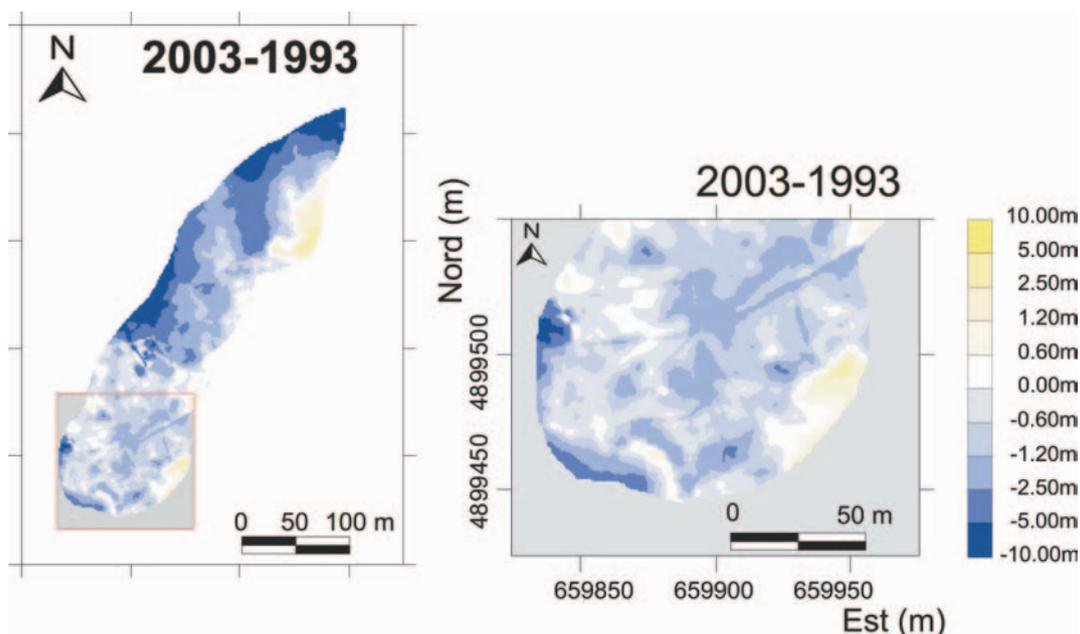


Fig. 30 Confronto tra il modello fotogrammetrico derivato dal rilievo effettuato nel 1993 ed il modello cinematico relativo al 2003.

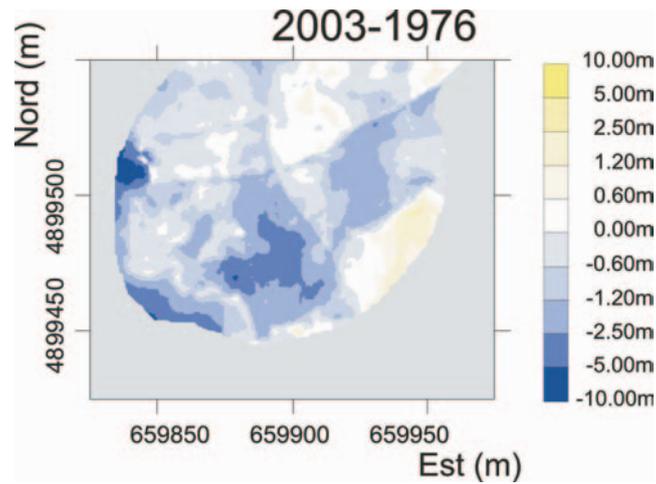


Fig. 31 Confronto tra il modello fotogrammetrico derivato dal rilievo effettuato nel 1976 ed il modello cinematico relativo al 2003.

in nicchia.

A causa di frequenti rimaneggiamenti dell'area in esame, dovuti a successivi lavori di consolidamento, non tutte le variazioni monitorate possono essere attribuite con certezza ad effettive evoluzioni temporali del fenomeno franoso.

Le applicazioni del laser a scansione, che

hanno fornito modelli digitali estremamente precisi ed affidabili, consentono di esaminare le variazioni temporali con maggiore risoluzione e precisioni centimetriche. Nella figura 32 è mostrato il confronto tra il modello relativo al giugno 2002 e dicembre 2003.

Sebbene nel primo caso l'acquisizione sia stata effettuata con uno strumento di generazio-

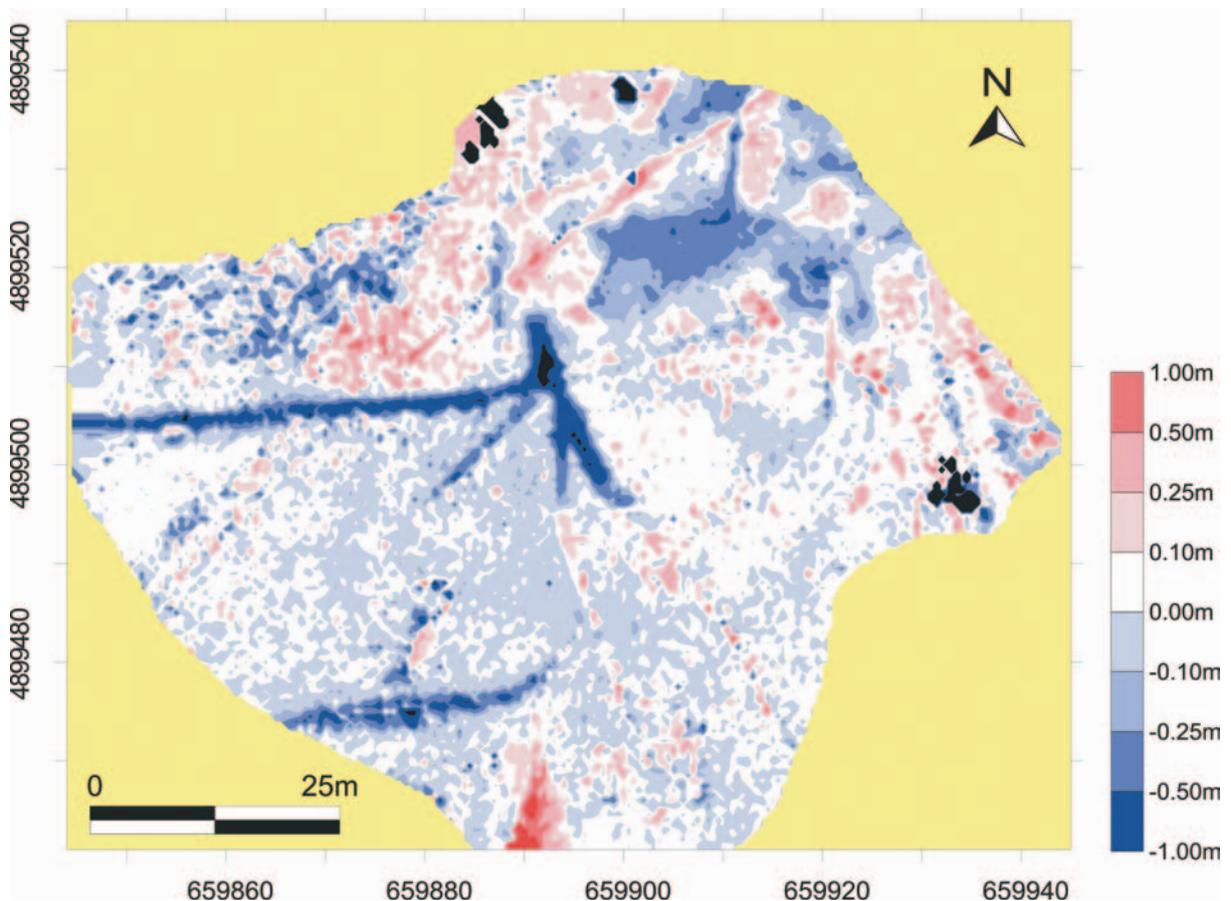


Fig. 32 Confronto tra i modelli ottenuti da rilievi laser a scansione (Dicembre 2003 - Giugno 2002).

ne ormai superata, il modello ottenuto ha la precisione confrontabile con quella del rilievo successivo. Oltre ad evidenziare l'effetto dei lavori di consolidamento e le variazioni che descrivono fenomeni di dilavamento, vengono messi in evidenza alcuni tratti dei canali di drenaggio che mostrano residui negativi in quanto, durante il primo rilievo, la localizzazione dei punti di presa non aveva consentito la loro completa acquisizione. A parte queste aree, il confronto conferma la precisione della metodologia in quanto nella maggior parte dell'area le differenze sono comprese tra +/- 10 cm.

Conclusioni

L'integrazione delle tecniche di rilievo GPS cinematico, fotogrammetria digitale aerea e laser scanner terrestre, analizzate ed applicate sulla frana di Rocca Pitigliana, ha permesso di effettuare con successo il monitoraggio delle variazioni morfologiche avvenute negli ultimi decenni.

La condizione necessaria per poter realizzare i confronti diretti tra modelli digitali del terreno, estratti dalle differenti metodologie e riferiti ad epoche successive, è stata l'univocità del sistema di riferimento adottato. A questo scopo è stato fondamentale istituire e misurare reti GPS a scale differenti (interne ed esterne alla frana) per fornire valori precisi (subcentimetrici) delle coordinate dei punti di controllo utilizzati nelle operazioni di georeferenziazione.

Nell'ambito di ogni metodologia di rilievo sono stati riscontrati vantaggi e svantaggi sia inerenti alle precisioni interne ottenibili che nella fase tecnica di applicazione.

Il sistema di rilievo in modalità GPS cinematico è strettamente vincolato alla capacità dell'operatore di percorrere l'area e quindi alla accessibilità della zona in esame; inoltre la presenza di alta vegetazione o di ostacoli quali pareti rocciose sub-verticali, edifici, ecc., potrebbe causare la perdita del segnale e di conseguenza, dei dati. D'altro canto, un'applicazione GPS cinematica consente, programmando il ricevitore in maniera opportuna e definendo il percorso dell'operatore, di coprire l'intera area di studio con una elevata densità di punti in tempi brevi e con bassi costi; questo permette di ripetere frequentemente il rilievo. Tenendo conto delle condizioni operative, nonostante la precisione sulla singola misura sia dell'ordine del centimetro, l'accuratezza finale del modello ottenuto raggiunge il decimetro.

La fotogrammetria digitale aerea, avvalendosi di archivi 'storici', permette di ricostrui-

re l'evoluzione temporale dei cambiamenti morfologici avvenuti negli ultimi decenni (dal 1930): i costi sono relativi all'acquisto dei fotogrammi ed alle elaborazioni specifiche; voli pianificati ad hoc comportano però notevoli sforzi economici. Le precisioni dipendono prevalentemente dalle quote relative di volo e variano generalmente tra poche decine di centimetri e il metro. Il sistema non è indipendente dalle condizioni atmosferiche o di visibilità, per cui è necessaria una pianificazione del volo in base non solo alla stagione ma anche all'orario del rilievo (per evitare ombre sulle immagini). Il vantaggio nell'utilizzo della fotogrammetria aerea è dato dalla possibilità di estrarre DTM di aree estese in tempi relativamente brevi. Naturalmente le precisioni sono anche influenzate dalla presenza di vegetazione e da morfologie caratterizzate da forti gradienti altimetrici che rendono difficoltosa l'analisi stereoscopica. In questi casi, per adattare il modello estratto automaticamente alla reale morfologia del terreno, sono indispensabili operazioni di 'editing'.

Le applicazioni del laser a scansione terrestre avvengono con estrema rapidità di esecuzione e permettono di rilevare oggetti fino a distanze superiori al chilometro in presenza di materiali ad alta riflettività. Generalmente, l'accuratezza dei modelli che si ottengono varia da valori millimetrici ad alcuni centimetri e dipende, non solo dalle caratteristiche di retrodiffusione dei materiali e dalle distanze in gioco, ma anche dalla visibilità (nebbia, pioggia, ecc..) e dalla presenza di vegetazione. Nonostante l'acquisizione possa avvenire in modalità "last impulse", dove solo l'ultimo eco del segnale viene registrato, limitando l'effetto dovuto a piante o altri ostacoli (reti, rami, ecc.), può essere necessario correggere manualmente il risultato. Il rilievo laser terrestre consente di ottenere un dettaglio superiore, rispetto alle tecniche illustrate, grazie alla notevole densità di punti ottenibili da ogni singola scansione.

L'approccio metodologico presentato in questo lavoro, dimostra la validità del monitoraggio basato sull'integrazione di differenti tecniche di rilievo per individuare le zone instabili di versanti e misurarne le effettive variazioni morfologiche in dettaglio.

Il metodo, applicato al monitoraggio della frana di Rocca Pitigliana, ha permesso di valutare le variazioni morfologiche avvenute tra il 1976 ed il 2003. In particolare si può notare una evidente perdita di materiale nella parte di nicchia della frana con relativo accumulo nella zona sottostante nel confronto tra i modelli fotogrammetrici del 1976 e 1993; nel restante corpo di frana non sono state rilevate altre differenze

significative. Considerando le risoluzioni (ordine del metro) delle immagini utilizzate è stato scelto di confrontare i modelli a distanza temporale maggiore. Successivamente, i residui ottenuti tra il modello cinematico del 2003 e quello fotogrammetrico del 1993, mostrano una chiara deformazione nella parte NO del corpo di frana: tali movimenti sono stati indotti dalle riattivazioni avvenute nel 1994 e nel 1999 (documentate in letteratura) e ciò che è stato possibile misurare a distanza di anni è sia l'effetto della frana che i conseguenti (e rilevanti) lavori di consolidamento realizzati per mettere in sicurezza la zona.

Le prospettive future sono indirizzate su un'analisi a scala variabile per un controllo esteso del territorio e l'individuazione delle zone in deformazione: a questo scopo è prevista l'integrazione della metodologia InSAR, per definire i campi di spostamento a scala regionale.

Bibliografia

- Abramowitz, M. and Stegun, I. (1972): *Hand Book of Mathematical Functions*, Dover Publications, New York.
- Achilli, V., P. Baldi, L. Baratin, C. Bonini, E. Ercolani, S. Gandolfi, M. Anzidei and F. Riguzzi (1997): *Digital photogrammetric survey on the island of Vulcano*, Acta Vulcanologica, **9** (2), 1-5.
- Anzidei M. e Esposito A. (2003): *Linee guida per la identificazione di siti idonei alla realizzazione di stazioni GPS permanenti e non permanenti*. Rapporti Tecnici INGV, Roma.
- Baldi, P., S. Bonvalot, P. Briole and M. Marsella (2000): *Digital photogrammetry and kinematic GPS for monitoring volcanic areas*, Geophysics Journal International, **142** (3), 801-811.
- Bertolini, G. and M. Pellegrini (2001): *The landslides of the Emilia Apennines (northern Italy) with reference to those which resumed activity in 1994-1999 period and required Civil Protection interventions*, Quaderni di Geologia Applicata, **8** (1), 27- 74.
- Beutler, G., G.W Hein, W.G Melbourne and G. Seeber (1995): *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborn Applications*, International Association of Geodesy Symposia, **115**, 275-338.
- Carboni, R., N. Casagli, A. Iotti, L. Monit and U. Tarchiani (2001): *La frana di Ca' di Sotto (San Benedetto Val di Sambro, Bologna): caratteri geomorfologici, analisi geotecniche ed interventi di mitigazione del rischio*, Quaderni di Geologia Applicata, **8** (1), 93-106.
- Cressie, N. A. C. (1990): *The Origins of Kriging*, Mathematical Geology, v.22, p.239-252.
- Cressie, N. A. C. (1991): *Statistics for Spatial Data*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 900 pp.
- Cruden, D. M. and D. J. Varnes (1996): *Landslides: investigation and mitigation*. In: Turner, A.K., Schuster, R. L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*, Washington, DC. *National Research Council, Transportation Research Board Special Report 247*, 36-75.
- Esu, F. (1977): *Behaviour of slopes in structurally complex formations*, Proc. Int. Symp. Teh Geotechnics of structurally Complex Formations, Capri, Italy, A.G.I., Rome, **2**, 292-304.
- Fabris, M. (2004): *Algoritmi e procedure di automazione in fotogrammetria digitale per lo studio di fenomeni deformativi*. Dottorato di ricerca in 'Scienze Geodetiche e Topografiche', Università degli Studi di Bologna.
- Gordon, S., D. Lichti and M. Stewart (2001): *Application of a High-Resolution, Ground-Based Laser Scanner for Deformation Measurements*, 10th FIG International Symposium on D eformation Measurements, 23-32.
http://rincon.gps.caltech.edu/FIG10sym/pdf/Session%20I_Paper%204.pdf
- Hofman-Wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins (1997): *GPS Theory and Practice*, edited by Spronger Verlag Wien, New York, 214-258.
- Kaab, A. and A. Funk (1999): *Modelling mass balance using photogrammetric and geophysical data: a pilot study at Griesgletscher*, Swiss Alps. Journal of Glaciology, **45**, 151, 575-583.
- Kraus, K. (1998): *Fotogrammetria*, edited by Levrotto & Bella, Torino, 445-496.
- Lichti, D. (2004): *a resolution measure for terrestrial laser scanners*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part XXX.
- LH Systems, LLC (1999): *SOCET SET – User's Manual*, LH Systems, LLC, San Diego.
- Mora, P., P. Baldi, G. Casula, M. Fabris, M. Ghiotti, E. Mazzini and A. Pesci (2003): *Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy)*, Engineering Geology, **68**, 103-121.
- Pesci, A., P. Baldi, A. Bedin, G. Casula, N. Cenni, M. Fabris, F. Loddo, P. Mora, M. Bacchetti (2004): *Digital elevation models for landslide evolution monitoring: application on two areas located in the Reno River Valley (Italy)* - Annals of Geophysics, accepted March

- 2004, in press.
- Pini, G.A., 1999. *Tectonosomes and Olistostromes in the Argille Scagliose of the northern Apennines, Italy*. Geol. Soc. Am., Spec. Pap. 335 (73 pp.).
- Regione Emilia-Romagna (1999): *I numeri sulle frane*, Pendragon, Bologna, 1-94.
- Rizos, C. and S. Han (1997): *Status and Trends for High Precision GPS Kinematic Positioning*, 1-18.
http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/work/pdf/kinematic_gps.pdf
- van Gysen, H., R., Coleman and B. Hirsch (1997): *Local crossover analysis of exactly repeating satellite altimeter data*. Journal of Geodesy, **72** (1):31-43.
- van Westen, C. J. and F. Lulie Getahun (2003): *Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models*, Geomorphology, **54**, 77–89.
- Wehr A. and U. Lohr (1999): *Airborne laser scanning – an introduction and overview*, ISPRS Jour. of Photogrammetry and Remote Sensing, **54**, 68-82.
- WP/WLI (1993): *A suggested method for describing the activity of a landslide*, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., **47**, 53–57.

Appendice A - campagne di misura GPS effettuate

Campagne di misura: Rilievi cinematici			
Data	Strumenti utilizzati		Passo campionamento
	ricevitore	antenna	
30/09/02	TRIMBLE 4000SSI TRIMBLE 4000SSI TRIMBLE 4700	TRM33429.00-GP TRM33429.00-GP TRM33429.00-GP	1 secondo
02/10/02	TRIMBLE 4000SSI TRIMBLE 4000SSI TRIMBLE 4700 TRIMBLE 5700	TRM33429.00-GP TRM33429.00-GP TRM33429.00-GP TRM41249.00	1 secondo
17/03/03 18/03/03 19/03/03	TRIMBLE 4700 TRIMBLE 5700 TRIMBLE 5700	TRM33429.00-GP TRM41249.00 TRM41249.00	1 secondo

Campagne di misura: Rilievi statici					
Data	Area di rilievo	Strumenti utilizzati		Passo Campionamento (secondi)	Tempo minimo Osservazione (minuti)
		ricevitore	antenna		
25/06/02	nicchia	TRIMBLE 4700 JPS EUROCARD	TRM33429.00-GP JPSLEGANT E	15	15
03/07/02	nicchia	TRIMBLE 4000SSI TRIMBLE 4000SST TRIMBLE 4700	TRM22020.00+GP TRM14532.00+GP TRM33429.00-GP	15	15
24/09/02	nicchia	TRIMBLE 4000SSI TRIMBLE 4700 TRIMBLE 4000SSI	TRM22020.00+GP TRM33429.00-GP TRM33429.00+GP	15	15
25/09/02	nicchia	TRIMBLE 4000SSI TRIMBLE 4700 TRIMBLE 4000SSI	TRM22020.00+GP TRM33429.00-GP TRM33429.00+GP	15	15
02/12/02 03/12/02	nicchia	TRIMBLE 4700 LEICA SR530	TRM33429.00-GP LEIAT502	15	15
05/12/02	nicchia	TRIMBLE 4700 LEICA SR530 TRIMBLE 5700	TRM33429.00-GP LEIAT502 TRM41249.00	15	15
06/12/02 09/12/02 10/12/02	nicchia	TRIMBLE 4700 LEICA SR530 TRIMBLE 5700	TRM33429.00-GP TRM29659.00 TRM41249.00	15	15
07/03/03	Area esterna fotogrammetria	TRIMBLE 4700 LEICA SR530 TRIMBLE 5700	TRM33429.00-GP TRM29659.00 TRM41249.00	15	15
11/03/03	Area esterna fotogrammetria	TRIMBLE 4700 LEICA SR530 TRIMBLE 5700	TRM33429.00-GP TRM29659.00 TRM41249.00	15	15

Appendice B - Monografie dei punti di controllo fotogrammetrici



PUNTO: PI01

N = 4899986.722 m

E = 660224.312 m

H = 555.220 m



PUNTO: PI02

N = 4900055.040 m

E = 660183.717 m

H = 531.379 m



PUNTO: PI03

N = 4899812.649 m

E = 659850.938 m

H = 632.331 m



PUNTO: PI04

N = 4899232.915 m

E = 659903.898 m

H = 689.744 m



PUNTO: PI05

N = 4899081.423 m

E = 659668.747 m

H = 728.745 m



PUNTO: PI06

N = 4898861.251 m

E = 659420.599 m

H = 775.164 m



PUNTO: PI07

N = 4899408.053 m

E = 659179.838 m

H = 728.491 m

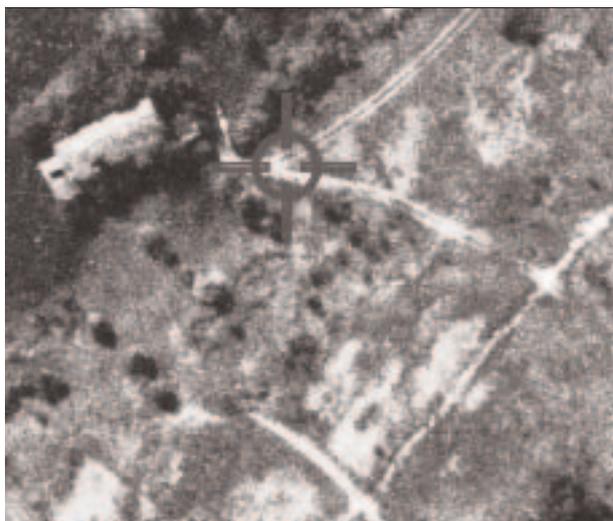


PUNTO: PI08

N = 4898796.593 m

E = 660908.737 m

H = 534.569 m

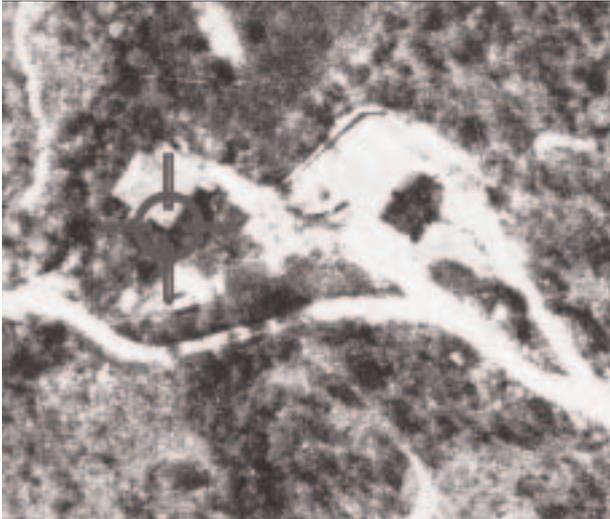


PUNTO: PI09

N = 4899134.637 m

E = 660184.748 m

H = 625.977 m



PUNTO: PI10

N = 4899667.097 m

E = 660717.047 m

H = 470.187 m



PUNTO: PI11

N = 4900228.933 m

E = 661158.802 m

H = 557.653 m



PUNTO: PI12

N = 4901319.262 m

E = 662049.759 m

H = 727.867 m



PUNTO: PI13

N = 4901323.447 m

E = 660427.249 m

H = 860.735 m



PUNTO: PI14

N = 4900986.996 m

E = 659861.692 m

H = 691.918 m



PUNTO: PI15

N = 4900538.654 m

E = 659446.067 m

H = 595.216 m



PUNTO: PI16

N = 4904990.438 m

E = 659732.538 m

H = 850.382 m



PUNTO: PI17

N = 4906561.653 m

E = 662116.330 m

H = 764.065 m



PUNTO: PI18

N = 4902838.409 m

E = 662471.703 m

H = 665.706 m



PUNTO: PI19

N = 4895729.647 m

E = 662662.268 m

H = 574.280 m



PUNTO: PI20

N = 4897381.299 m

E = 657824.561 m

H = 831.298 m



PUNTO: PI21

N = 4894495.526 m

E = 659664.302 m

H = 370.245 m



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605 - 00143 Roma - Italy
www.ingv.it