CONTROLLO DEFORMATIVO DI UN'AREA IN FRANA MEDIANTE INTEGRAZIONE DI TECNICHE TOPOGRAFICHE E FOTOGRAMMETRICHE SULL'ISOLA DI STROMBOLI

Paolo BALDI (*), Massimo FABRIS (*,**), Maria MARSELLA (***),
Alberico SONNESSA (***)

(*) Dipartimento di Fisica – Settore Geofisica
Università di Bologna, Viale Berti Pichat, 8 – 40127 Bologna
(**) Laboratorio di Rilevamento e Geomatica – DAUR – Dipartimento di Architettura, Urbanistica e Rilevamento
Università di Padova, Via Marzolo, 9 – 35131 Padova, e-mail: massimo.fabris@unipd.it
(***) DITS – Università "La Sapienza", Roma, Via Eudossiana, 18 – 00184 Roma

Riassunto

Per controllare fenomeni deformativi di ampie zone con precisioni elevate è possibile integrare il rilievo topografico mediante stazione totale con tecniche di fotogrammetria digitale multi-temporale. Le due metodologie sono state utilizzate durante l'eruzione 2002-2003 del vulcano Stromboli.

Nel lavoro vengono illustrati i risultati ottenuti dai rilievi eseguiti sulla parte sommitale del versante della Sciara del Fuoco, dove la messa in posto delle colate ha prodotto un'area di accumulo considerata potenzialmente instabile. La disponibilità di rilievi aerofotogrammetrici effettuati dopo la fine dell'eruzione ha permesso di misurare le variazioni altimetriche attraverso il confronto di DTM (*Digital Terrain Model*) multi-temporali e vettori spostamento planimetrici ottenuti tramite la misura delle coordinate di numerosi punti naturali identificati su tutte le immagini. Sulla stessa area, al termine della fase effusiva, è stato possibile installare alcuni riflettori come punti di controllo da misurare tramite una stazione integrata posizionata all'esterno del versante. Dal 20 ottobre 2003 al 28 luglio 2006 sono stati effettuati complessivamente sette rilievi. Le misure topografiche sono state confrontate ed integrate con quelle ottenute per via fotogrammetrica. I dati ottenuti hanno contribuito al monitoraggio delle deformazioni ancora in atto sul versante dopo la fine dell'eruzione.

Abstract

Multi-temporal digital photogrammetry together with topographic surveys carried out by means of a total station, allows to control deformation phenomena of wide zones with high precisions, by means of DTMs (Digital Terrain Model) comparison, and/or by means of single points 3D coordinates measurement. These methodologies have been used during the 2002-2003 Stromboli eruption providing useful data at the monitoring activity.

A potentially unsteady accumulation area has been progressively generated by the lava flows on the top of the Sciara del Fuoco slope during the eruption. The availability of aerial photogrammetric surveys allowed to compare high resolution multi-temporal DTMs evaluating elevation changes. Moreover, a temporal displacements map was obtained measuring and comparing the coordinates of several natural points. At the same time, sixteen topographical targets were placed on the lava field, and a local reference system was built on the upper SE flank of the Sciara (Bastimento) in order to allow measurements by means of a total station. Seven measurements were carried out between 20 October 2003 and 28 July 2006. The topographic measurements were compared and integrated with the photogrammetric data.

Introduzione

La recente eruzione del vulcano Stromboli, iniziata il 28 dicembre 2002 con la fuoriuscita di flussi lavici dai crateri sommitali, proseguita il 30 dicembre 2002 con il distacco di frane sub-aeree e sottomarine e terminata nel mese di luglio 2003 (Puglisi at al., 2005; Tommasi et al., 2005), ha prodotto un'area di accumulo lavico (di seguito indicata come pianoro) situata al di sotto della bocca di NE del vulcano, nella parte sommitale del versante della Sciara del Fuoco, ad una quota di circa 600 m s.l.m. (figura 1).

Il pianoro è costituito dalla sovrapposizione di più colate laviche nella parte sub-pianeggiante corrispondente al terrazzo di frana e poi incanalatesi lungo il versante della Sciara. L'accumulo di materiale ha portato alla formazione di un deposito con spessore massimo superiore a 50 m. L'area è caratterizzata da una intensa fratturazione superficiale per lo più imputabile al progredire del processo di raffreddamento del materiale effusivo che, dopo la messa in posto, ha mantenuto temperature molto elevate al suo interno, soprattutto in questa zona contraddistinta da strutture a tumulo prodotte dal rapido impilamento di piccoli flussi lavici. La geometria di queste fratture è per lo più trasversale alle singole unità di flusso. Sul campo lavico sono inoltre presenti due *hornitos*, formatisi a seguito della fuoriuscita di gas con ricaduta di brandelli di magma attorno al punto di emissione.

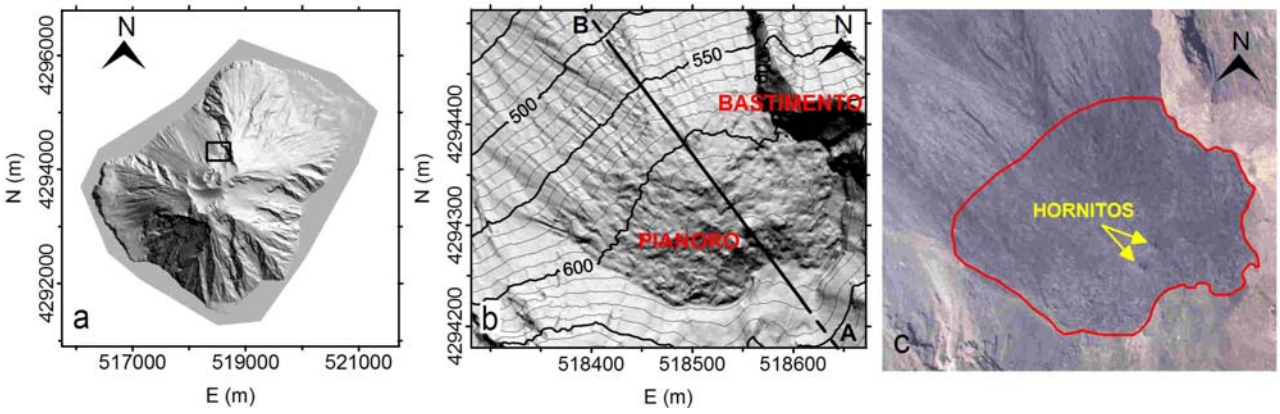

Figura 1 – a) Localizzazione del pianoro all'interno della Sciara del Fuoco; b) Shaded relief del pianoro e indicazione della sezione AB; c) Ortofoto del pianoro con indicazione dei due hornitos

Rilievi aerofotogrammetrici

Il monitoraggio del versante della Sciara del Fuoco durante l'eruzione è stato gestito dal Dipartimento della Protezione Civile; fra le diverse attività svolte, la fotogrammetria digitale multi-temporale ha rivestito un ruolo primario (Baldi et al., 2004).

Anche dopo la fine dell'eruzione sono proseguiti i controlli sulla stabilità del versante; in particolare sono stati effettuati altri quattro rilievi fotogrammetrici, estraendo DTM di precisione ad elevata risoluzione (0.5 m) dell'area interessata dalle frane e dai flussi lavici durante il periodo di attività (Baldi et al., 2005).

Per produrre DTM nello stesso sistema di riferimento sono stati utilizzati, per l'orientamento di tutti i modelli, GCP (*Ground Control Points*) materializzati sul terreno tramite segnali ben visibili sulle immagini aeree, collocati in aree stabili all'esterno del versante della Sciara del Fuoco, e misurati con la metodologia GPS.

L'evoluzione del versante della Sciara del Fuoco in corrispondenza del pianoro è schematizzata in figura 2, dove vengono mostrati i profili e le variazioni altimetriche lungo la sezione AB (figura 1b).

In particolare sono riportati i profili del 29 maggio 2001 (precedente l'eruzione), del 27 gennaio 2003 e del 26 luglio 2003 che documentano la formazione dell'area di accumulo lavico, e le

variazioni in quota rispetto alla situazione del maggio 2001, che evidenziano l'accumulo iniziale e la successiva erosione in prossimità della linea di rottura di pendenza del pianoro.
Sui quattro modelli stereoscopici prodotti dopo la fine dell'eruzione, sono state restituite anche le coordinate tridimensionali di numerosi punti naturali visibili sui modelli successivi e localizzati sia all'interno del pianoro sia all'esterno della Sciara, in aree presunte stabili. Questi ultimi hanno consentito di stimare la precisione del metodo: le differenze tra le coordinate dei punti restituiti nei rilievi successivi presentano media nulla e deviazione standard inferiore alla dimensione del pixel (~ 13 cm). A causa delle condizioni geometriche di acquisizione e delle differenti situazioni di illuminazione, non è stato possibile seguire l'evoluzione di un singolo elemento naturale sui quattro rilievi.

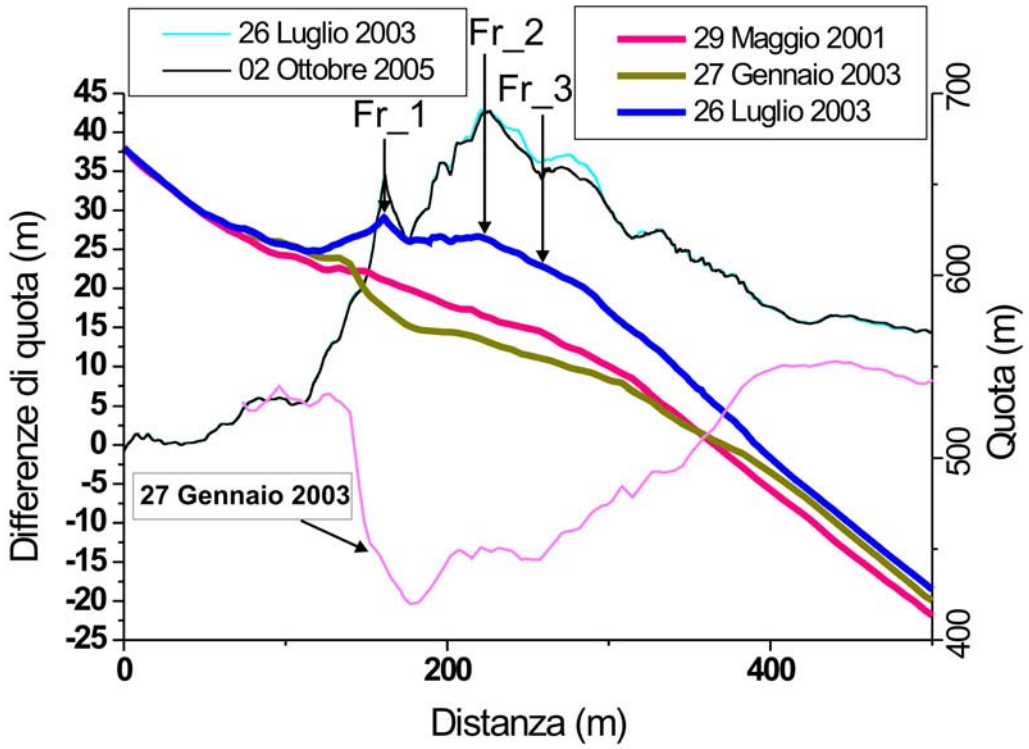

Figura 2 – Profili altimetrici e variazioni di quota lungo la sezione AB di figura 1b

Rilievi topografici
Nel luglio 2003, dall'analisi delle foto aeree e mediante ricognizioni in situ, è stata individuata una grande frattura (di seguito indicata come frattura 1, Fr_1, figura 2), allungata nella direzione passante per i due *hornitos* e che sembra proseguire a sud fino alla fine del campo lavico. La frattura, che separa due domini con spessori di lava molto diversi (15 m max a SE ed oltre 60 m a NW), è posta in corrispondenza del dicco di alimentazione dell'eruzione 2002 – 2003 e corrisponde all'orlo della scarpata della frana del 30 dicembre. In questa area la frana si è mobilizzata senza evolvere totalmente in modo distruttivo e pertanto rappresenta un fattore di possibile rischio per la stabilità del corpo lavico (Tommasi et al., 2003).
Nel corso dell'attività di monitoraggio sono state individuate due ulteriori discontinuità. La prima (frattura 2, Fr_2), emersa dal confronto delle acquisizioni fotogrammetriche 2003 – 2004, è situata circa a metà del terrazzo di frana, e si estende per circa trenta metri. La seconda (frattura 3, Fr_3), evidenziatasi durante il periodo di misura 2004 – 2005, ha origine in corrispondenza dell'attacco del campo lavico con il fianco Est della Sciara, e prosegue in direzione NE – SW per circa 90 metri, all'incirca parallela alla frattura 2003. Da osservazioni in loco la frattura presenta un'apertura di circa 1.5 m e una profondità di circa 6 m (figura 3).

Per poter disporre di un controllo di maggior precisione rispetto al metodo fotogrammetrico, è stato istituito, a partire dall'ottobre 2003, un sistema di monitoraggio topografico, finalizzato all'individuazione di eventuali deformazioni estensionali indicatrici di fenomeni di instabilità. Sono stati materializzati due vertici nella zona stabile del Bastimento, a quota 750 m, utilizzati rispettivamente per il posizionamento della stazione totale integrata Leica TCR703 e l'orientamento delle misure angolari.
La posizione dei punti di controllo è stata scelta tenendo conto delle seguenti esigenze: individuare la zona del campo lavico interessata dai movimenti più rilevanti; discriminare tra i movimenti di carattere locale e quelli che indicano il movimento complessivo della parte superiore del versante. I punti di controllo sono stati materializzati mediante *target* topografici disposti su tre allineamenti lungo l'immersione del versante in direzione SE – NO, in modo tale da permettere l'immediata determinazione dei movimenti estensionali a cavallo delle discontinuità (figura 3).

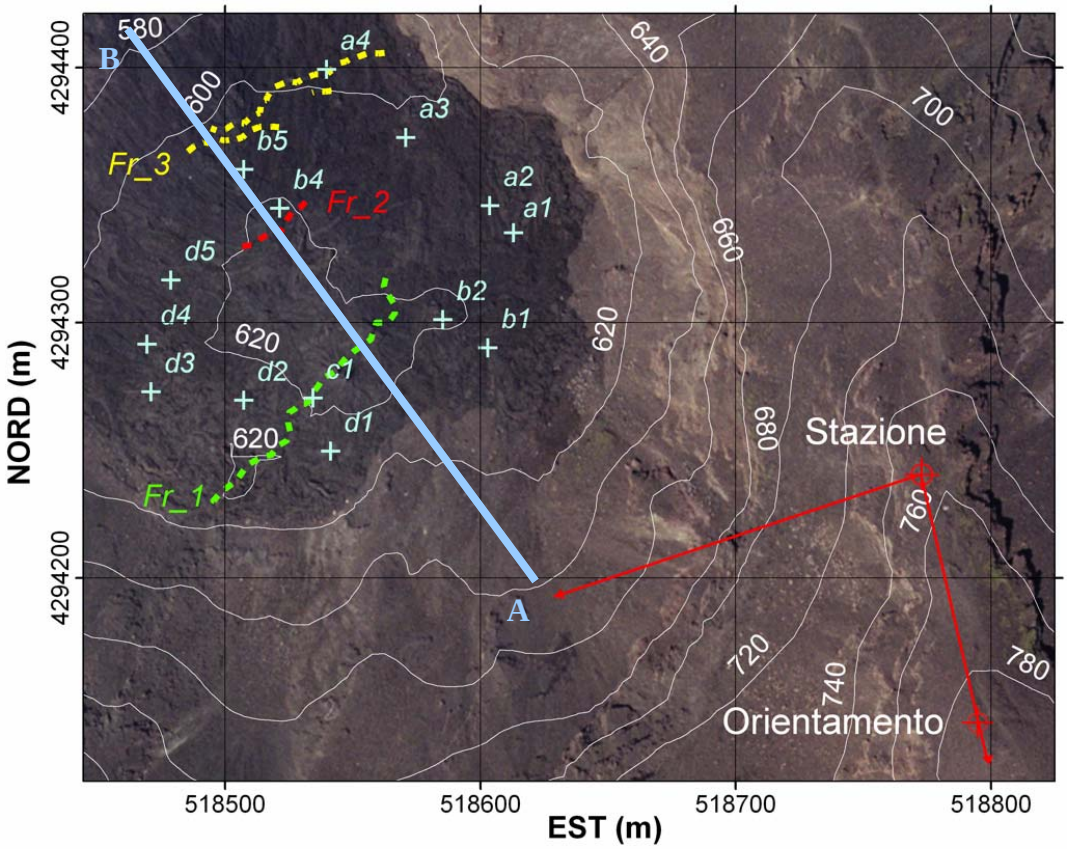

Figura 3 – Distribuzione planimetrica dei target topografici e delle 3 fratture sull'area del pianoro

Alcuni vertici sono stati dotati di un ulteriore *target* riconoscibile anche sulle immagini aeree per permettere di confrontare le misurazioni topografiche con quelle ottenute per via fotogrammetrica (tramite analisi multi-temporali di immagini ad alta risoluzione). Dal 20 ottobre 2003 al 28 luglio 2006 sono stati effettuati complessivamente sette rilievi.

Analisi dei risultati

I DTM ad alta risoluzione, estratti automaticamente e successivamente editati nelle aree di scarsa correlazione mediante il software *Socet Set*, sono stati confrontati direttamente per valutare le variazioni morfologiche; il confronto è stato effettuata tra DTM successivi (settembre 2003 – luglio 2003, agosto 2004 – settembre 2003 e ottobre 2005 – agosto 2004).
Il primo confronto, che si riferisce ad un piccolo intervallo temporale, non ha fornito variazioni significative, mentre i successivi hanno indicato deformazioni in atto nella componente altimetrica

(figura 4). Sovrapposte alle mappe dei residui, sono rappresentati i vettori spostamento ottenuti sia mediante la fotogrammetria che con osservazioni topografiche (questi ultimi riferiti all'intervallo temporale dei rilievi fotogrammetrici).
In figura 5 vengono riportati, separatamente, gli andamenti della distanza inclinata e della quota dei punti monitorati con la tecnica topografica.

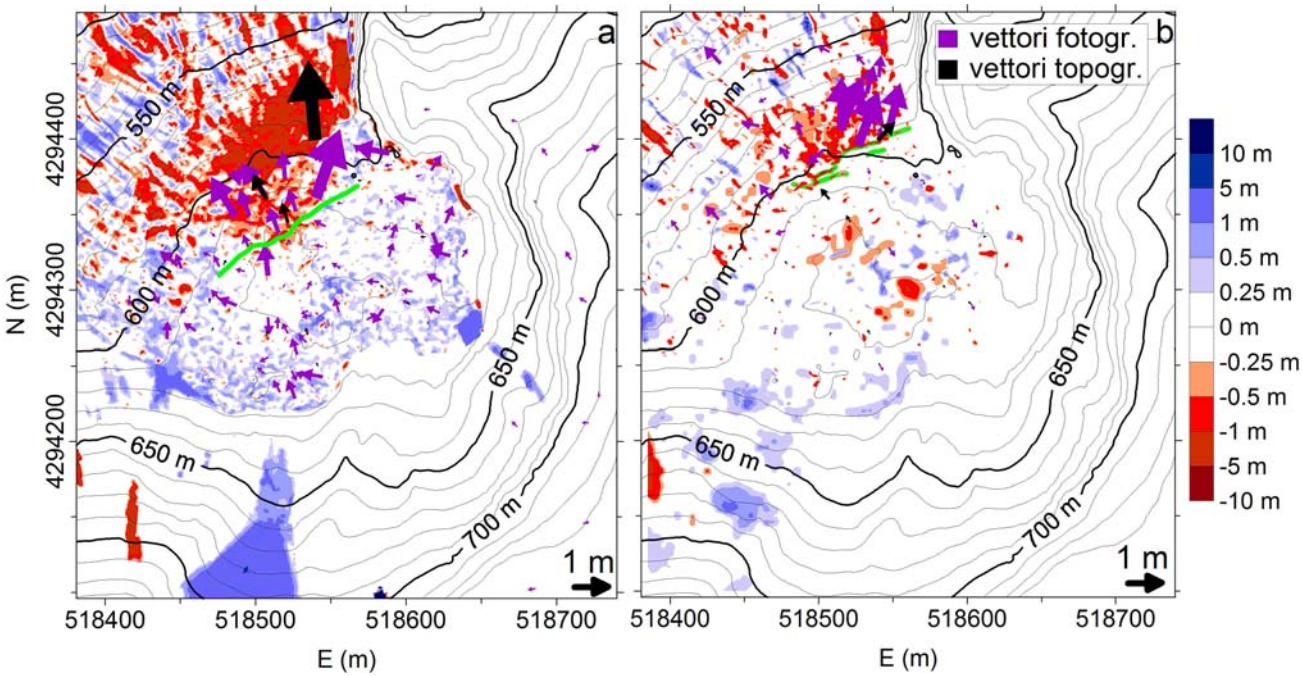

Figura 4 – Confronti tra DTM sovrapposti alle mappe dei vettori spostamento fotogrammetrici e topografici: a) agosto 2004 – settembre 2003; b) ottobre 2005 – agosto 2004

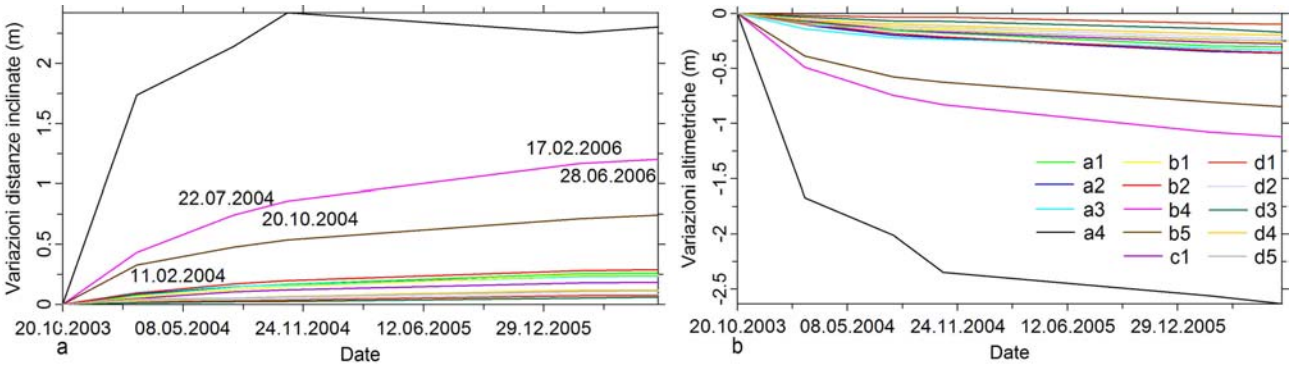

Figura 5 – Andamento degli spostamenti osservati tramite il rilievo topografico, rappresentati in termini di variazione della distanza inclinata (a) e quota (b)

Nel confronto agosto 2004 – settembre 2003 (figura 4a) la mappa dei residui fornita dal confronto di DTM, indica un'erosione significativa in corrispondenza del cambiamento di pendenza dell'area del pianoro; inoltre, risulta evidente un'area di accumulo in prossimità dell'area craterica dovuta sia a deposito di materiali eruttati durante le esplosioni che si susseguono costantemente, che a piccole frane sul versante circostante (figura 4a). Gli spostamenti planimetrici osservati (sia fotogrammetrici che topografici) confermano una deformazione maggiore ai bordi dell'area di accumulo lavico, a valle della frattura Fr_2. Solo in alcune parti non è stato possibile riconoscere gli stessi punti naturali sui voli analizzati: ciò è dovuto a fenomeni di erosione locale che quindi non coinvolgono tutto il pianoro ma solo piccole porzioni; anche i vettori più grandi (dell'ordine di

1÷1,5 m), presenti in corrispondenza del cambiamento di pendenza, indicano fenomeni dovuti a variazioni locali, in quanto presentano una direzione perpendicolare alle curve di livello ma non coincidente con la direzione media di massima pendenza del versante. I risultati ottenuti dai rilievi topografici sono concordi con quelli derivati per via fotogrammetrica. Sulla sommità del pianoro gli spostamenti osservati sono ridotti rispetto a quelli relativi a valle della frattura Fr_2 e possono essere imputati a deformazioni del corpo lavico (figura 5).
Nel confronto ottobre 2005 – agosto 2004 (figura 4b) gli spostamento osservati risultano ridotti rispetto al periodo precedente e concentrati a valle della frattura Fr_3.

Conclusioni

I dati acquisiti durante il monitoraggio topografico hanno messo in luce la presenza di movimenti differenziali del terrazzo lavico, più evidenti nella parte prospiciente il ciglio di frana. Le variazioni osservate nella distanza inclinata e vettori spostamento nelle tre direzioni Nord, Est e Quota delle misure topografiche e fotogrammetriche hanno presentato un andamento crescente fino alla data del 20 ottobre 2004 ed una attenuazione successiva dei movimenti.
I dati raccolti hanno permesso di osservare in maniera diretta l'evoluzione del terrazzo lavico e, attraverso il confronto con i dati fotogrammetrici, di fornire indicazioni utili a valutare i fenomeni in atto sul versante della Sciara del Fuoco.
Le deformazioni osservate possono essere imputate a processi di raffreddamento, fatturazione, compattazione e instabilità superficiali; uno scivolamento di tutto il materiale accumulato, rispetto ad un piano di scorrimento profondo (coincidente con quello della frana del dicembre 2002, come ipotizzato da Tommasi et al., 2005) sembra poter essere escluso in quanto i controlli topografici su punti posti al piede del pendio non hanno evidenziato spostamenti nel 2005 (Puglisi et al., 2005). Dall'analisi che è stata svolta risulta evidente che il versante, ed in particolare l'area di accumulo lavico, sono lontani da una situazione di equilibrio e che i processi deformativi sono ancora presenti anche se vanno progressivamente diminuendo.

Bibliografia

Baldi P., Fabris M., Marsella M., Monticelli R. (2004), "Utilizzo di DTM di precisione ad elevata risoluzione per il controllo del pendio Sciara del Fuoco dell'Isola di Stromboli", *Atti della 8° Conferenza Nazionale ASITA*, 1: 241-246

Baldi P., Fabris M., Marsella M., Monticelli R. (2005), "Monitoring the morphological evolution of the Sciara del Fuoco during the 2002-2003 Stromboli eruption using multi-temporal photogrammetry", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59: 199-211

Puglisi G., Bonaccorso A., Mattia M., Aloisi M., Bonforte A., Campisi O., Cantarero M., Falzone G., Pugliesi B., Rossi M. (2005), "New integrated geodetic monitoring system at Stromboli volcano (Italy)", *Engineering Geology*, 79: 13-31

Tommasi P., Chiocci F.L., Coltelli M., Marsella M., Pompilio M. (2003), "Analysis of the first data on the instability phenomena associated to the 2002-03 Stromboli volcano lava flow eruption", *Int. Symposium Flows 2003*, Sorrento 15-16 may 2003

Tommasi P., Baldi P., Chiocci F.L., Coltelli M., Marsella M., Pompilio M., Romagnoli C. (2005), "The landslide sequence induced by the 2002 eruption at Stromboli volcano", *Landslide – Risk analysis and sustainable disaster management*, Sassa K, Fukuoka H., Wang F.W., Wang G. (Eds.), Springer Verlag, cap. 32: 251-258