

## **Analisi delle deformazioni della frana di Patigno (MC) mediante integrazione di dati aerofotogrammetrici multi-temporali, CGNSS e InSAR**

Nicola Cenni <sup>(a)</sup>, Massimo Fabris <sup>(b)</sup>, Simone Fiaschi <sup>(c)</sup>, Mario Floris <sup>(a)</sup>, Pierangelo Fabbroni <sup>(d)</sup>, Vittorio D'Intinosante <sup>(d)</sup>, Massimo Baglione <sup>(d)</sup>

<sup>(a)</sup> Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, via Gradenigo, 6 – 35131 Padova, e-mail: [nicola.cenni@unipd.it](mailto:nicola.cenni@unipd.it), [mario.floris@unipd.it](mailto:mario.floris@unipd.it)

<sup>(b)</sup> Laboratorio di Rilevamento e Geomatica – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova, via Marzolo, 9 – 35131 Padova, e-mail: [massimo.fabris@unipd.it](mailto:massimo.fabris@unipd.it)

<sup>(c)</sup> School of Earth Sciences, UCD University College Dublin, Belfield, Dublin, Ireland, e-mail: [simone.fiaschi@ucd.ie](mailto:simone.fiaschi@ucd.ie)

<sup>(d)</sup> Regione Toscana, Settore Sismica - Ufficio Prevenzione Sismica, Via San Gallo 34/a, Firenze, Italy

### **Riassunto**

In questo lavoro vengono valutate le deformazioni della frana di Patigno (Zeri - Massa Carrara), localizzata nel bacino del fiume Magra (Appennino settentrionale), utilizzando la fotogrammetria d'archivio relativa all'intervallo temporale 1975-2013, osservazioni GNSS in continuo dal 2004 al 2019 e dati SAR multi-temporali dal 2015 al 2019. L'osservazione geodetica ha permesso di stimare una velocità di scivolamento del corpo di frana di circa 3.5 cm/anno, lungo la direzione di massima pendenza, in accordo con le stime determinate mediante le altre tecniche.

### **Abstract**

In this work the displacements of the Patigno landslide, a deep-seated gravitational slope deformation located in the Northern Apennine (Zeri - Massa Carrara, Italy), are evaluated using archival photogrammetry of the 1975-2013 period, continuous GNSS observations and multi-temporal SAR data from 2015 to 2019. The geodetic observation permitted to estimate a speed of the landslide body of about 3.5 cm/year along the direction of maximum slope, which is in agreement with the results obtained with the other techniques.

### **Introduzione**

Le variazioni morfologiche di aree instabili possono essere determinate utilizzando differenti metodologie che permettono di effettuare rilievi ripetuti nel tempo: la fotogrammetria digitale aerea, il LiDAR, l'analisi di immagini satellitari quali quelle acquisite in ambito interferometrico (SAR), le misure GNSS nelle diverse modalità oltre alle classiche applicazioni topografiche.

La fotogrammetria digitale è una delle metodologie più efficaci per la produzione di modelli digitali delle superfici (DEM – Digital Elevation Model),

che permettono la ricostruzione 3D della superficie del terreno ad alta risoluzione e precisione. I DEM possono essere utilizzati per effettuare analisi morfologiche della superficie della terreno: accurati modelli acquisiti periodicamente su un'area caratterizzata da significative variazioni morfologiche vengono utilizzati per valutarne le deformazioni superficiali (Baldi et al., 2008). Un secondo approccio permette di ottenere anche vettori spostamento di punti distribuiti nell'area di studio misurando la posizione di elementi naturali e/o artificiali riconosciuti sulla serie multi-temporale di immagini stereoscopiche. Gli archivi di immagini fotogrammetriche sono una fonte di dati storici che in alcuni casi permettono di modellare le deformazioni di aree instabili nell'arco degli ultimi 70-80 anni. Nell'elaborazione di immagini storiche viene utilizzato il metodo conosciuto come fotogrammetria multi-temporale d'archivio per estrarre informazioni metriche dalle foto aeree (Chandler, Cooper, 1988).

In questo lavoro vengono presentati i risultati ottenuti dal monitoraggio delle deformazioni superficiali della frana di Patigno (Massa Carrara) mediante le osservazioni di una stazione GNSS permanente (interna alla frana ed operativa dal gennaio 2004), l'analisi di rilievi aero-fotogrammetrici effettuati nel 1975, 1987, 2004, 2010 e 2013, e dati SAR multi-temporali del satellite Sentinel-1 dal 2015 al 2019. L'analisi delle osservazioni GNSS acquisite dalla stazione permanente ubicata all'interno del corpo di frana indica una velocità di scivolamento orizzontale di circa 3.5 cm/anno con conseguente abbassamento di 0.4 cm/anno. La durata e l'intensità delle precipitazioni possono influenzare il comportamento cinematico del corpo di frana, come dimostrato nel lavoro di Baldi et al. 2008 e quindi i valori precedentemente riportati.

Il confronto tra i risultati ottenuti con le diverse tecniche, SAR, fotogrammetria a GNSS, ha permesso di determinare con una certa precisione il quadro cinematico del corpo di frana.

### **I dati fotogrammetrici**

La frana di Patigno (Comune di Zeri. Massa Carrara) si trova nella parte interna dell'Appennino settentrionale, al confine tra Toscana, Emilia-Romagna e Liguria (figura 1).

La determinazione delle variazioni superficiali della frana è stata effettuata mediante 5 rilievi aero-fotogrammetrici realizzati nel 1975, 1987, 2004, 2010 e 2013 (tabella 1): le diapositive dei primi tre voli sono state rasterizzate mediante lo scanner fotogrammetrico Wehrli Raster Master RM2 a 12  $\mu\text{m}$ , ottenendo una risoluzione a terra delle immagini digitali variabile da 16 cm a 36 cm. I rilievi del 2010 e 2013 sono stati realizzati con camera digitale metrica Vexcel UltraCam Xp. Le immagini del 1987, 2004, 2010 e 2013 sono caratterizzate da una scarsa visibilità a terra a causa della copertura vegetale: al contrario, le immagini del 1975 presentano una buona visibilità su tutta l'area di frana grazie alla quale è stato possibile estrarre un DEM tramite l'utilizzo del software Socet Set e ottenere manualmente il rispettivo DTM (Digital Terrain Model). Per ottenere il sistema di riferimento comune ai 5 set di dati, sono stati identificati sulle immagini punti naturali ed artificiali comuni, supposti stabili, localizzati esternamente all'area di frana; le coordinate di questi punti, utilizzati come punti fotografici d'appoggio, sono state misurate

sulla CTR (Carta Tecnica Regionale) in scala 1:5000 ottenuta dallo stesso rilievo aero-fotogrammetrico del 1975 utilizzato in questo studio.

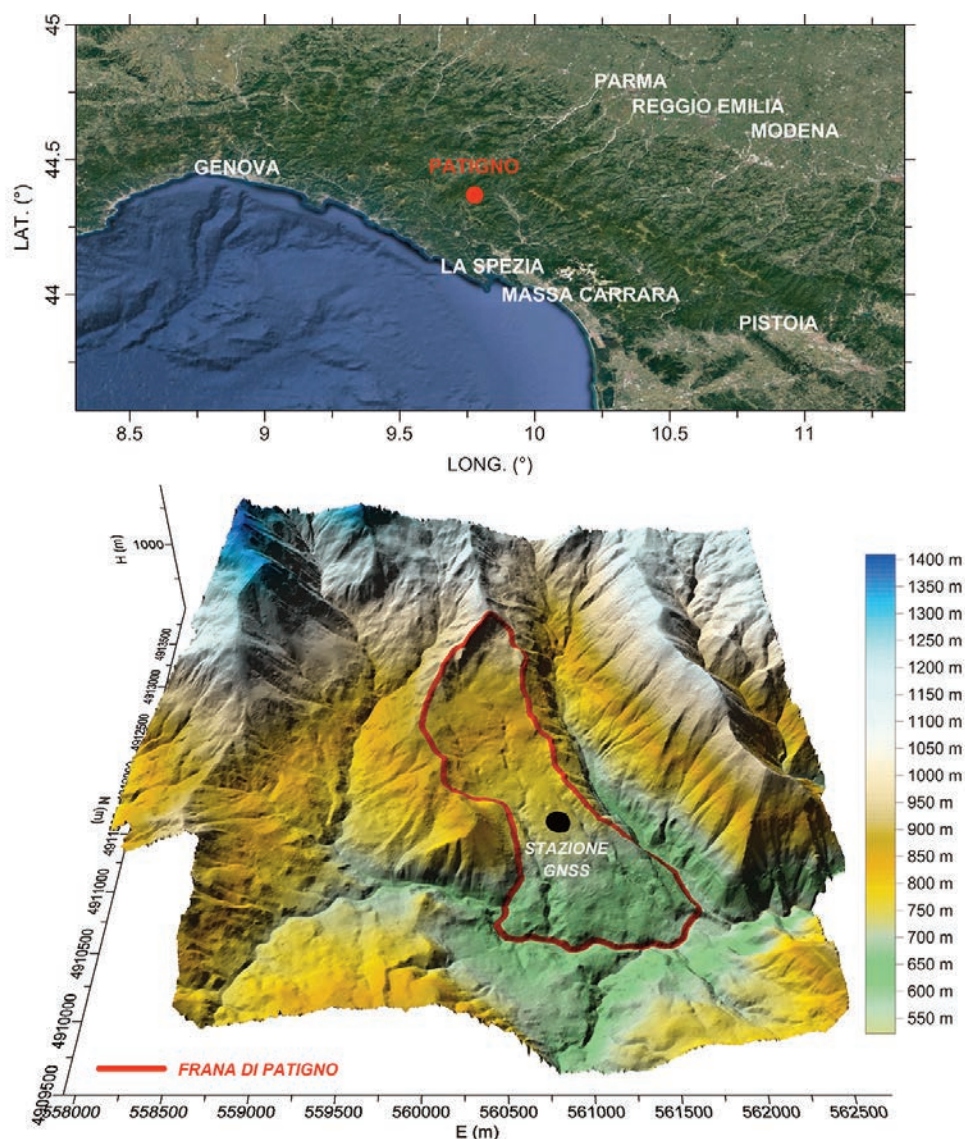


Figura 1 – Localizzazione dell’area di studio e visualizzazione della frana di Patigno sul DTM del 1975

Rilievo	N. strisciate	N. immagini	Scala	Focale calibrata (mm)	GSD (cm)
1975	2	7	1:13000	152.67	16
1987	2	8	1:13000	152.22	16
2004	1	3	1:30000	153.64	36
2010	3	18	1:10000	100.50	15
2013	2	8	1:30000	100.50	40

Tabella 1 – Caratteristiche dei 5 rilievi aero-fotogrammetrici utilizzati in questo studio

Dopo aver ottenuto i modelli stereoscopici e verificato la stabilità del sistema di riferimento (Baldi et al., 2008), sono stati estratti 5 DEM automatici con griglia



di passo 5 m su un'area che comprende la frana e le porzioni circostanti: dai DEM è stato possibile ottenere le corrispondenti ortofoto (figure 2 e 3). Il confronto tra i modelli digitali fornisce le variazioni di massa nel periodo analizzato: in questo caso, tuttavia, l'errore di co-registrazione, la copertura vegetativa ed il tipo di fenomeno deformativo in atto (scivolamento delle masse lungo il versante) non permettono di ottenere risultati accettabili dal confronto tra i modelli (Baldi et al., 2008).

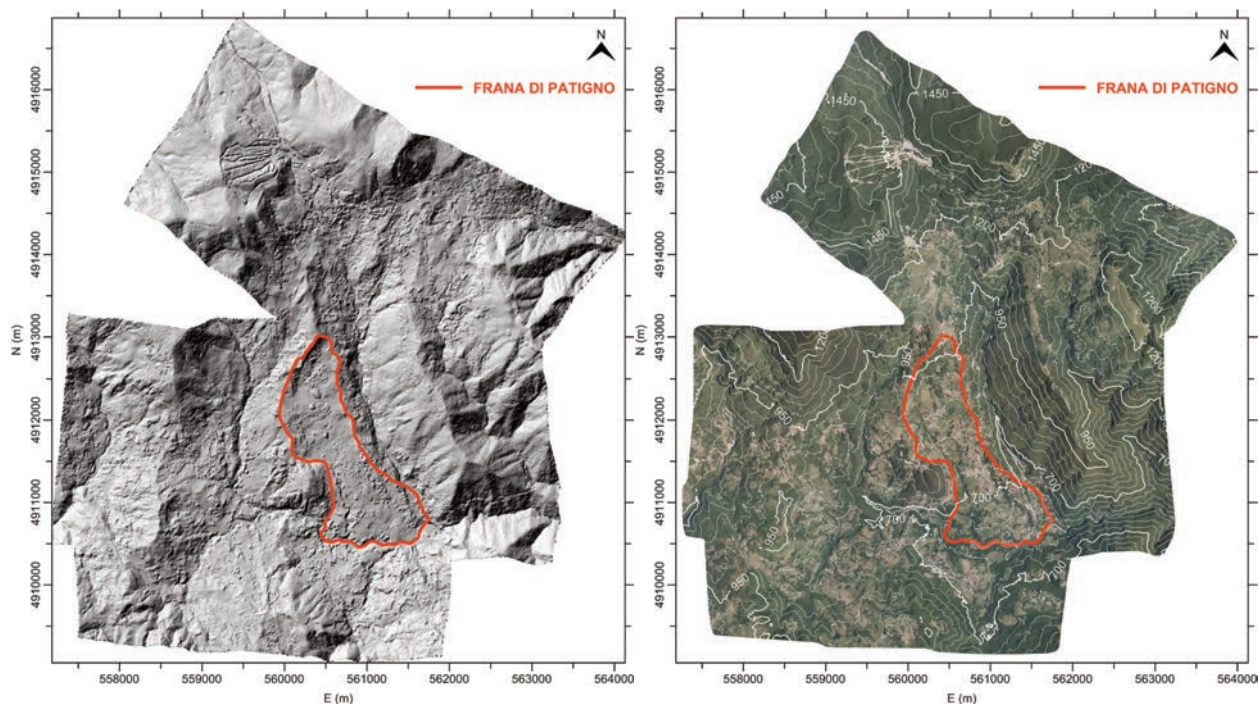


Figura 2 – DEM ed ortofoto della frana di Patigno e dell'area circostante ottenute dal rilievo aereo-fotogrammetrico del 2010

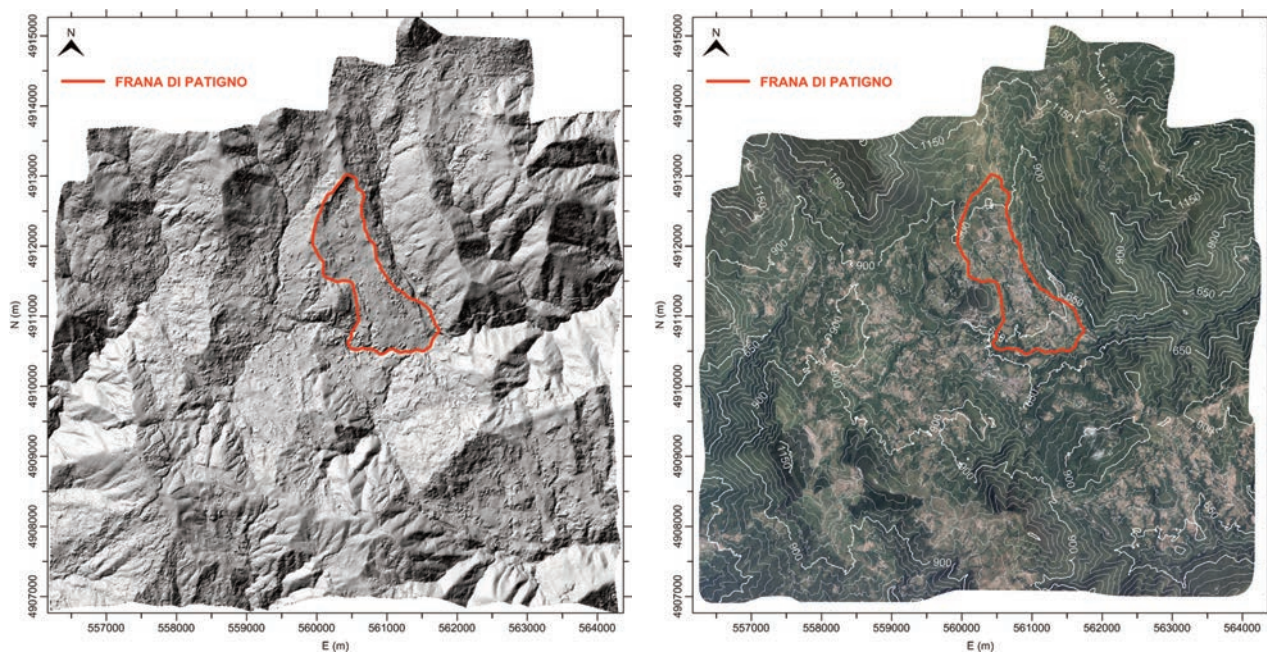


Figura 3 – DEM ed ortofoto della frana di Patigno e dell'area circostante ottenute dal rilievo aereo-fotogrammetrico del 2013

Per ottenere le variazioni della frana di Patigno è stato quindi utilizzato un approccio diverso: sono stati identificati e misurati in stereoscopia 293 punti omologhi in tutto il set di immagini multi-temporali (principalmente spigoli di edifici): dal confronto delle coordinate relative sono stati ottenuti vettori spostamento 3D nei quattro periodi 1975-1987, 1987-2004, 2004-2010 e 2010-2013. Data la copertura vegetale, i punti sono stati misurati quasi esclusivamente nelle aree edificate delle frazioni di Patigno, Noce e Val di Termine e, limitatamente, su edifici isolati.

### **I dati GNSS**

Nel dicembre del 2003, nella località di Patigno è stata posizionata ed attivata una stazione GNSS permanente per studiare l'evoluzione nel tempo dei movimenti del settore di frana che interessa il paese. L'analisi delle osservazioni GNSS giornaliere è stata eseguita utilizzando il software GAMIT/GLOBK. Questa analisi è stata effettuata considerando come riferimento le stazioni permanenti ubicate all'esterno del corpo di frana, che purtroppo non hanno garantito un funzionamento continuo durante il periodo di monitoraggio. Per questo motivo è stato necessario utilizzare come riferimento più di una stazione permanente.

Le serie temporali giornaliere delle componenti Nord, Est e Quota della stazione di Patigno (PATG) sono state analizzate per determinare sia la velocità media su tutto l'intervallo di tempo considerato che il periodo e l'ampiezza degli eventuali segnali stagionali registrati. Per quanto riguarda le componenti orizzontali, dall'analisi eseguita è emersa una velocità di 3.1 cm/anno verso sud, di 1.7 cm/anno verso est ed una abbassamento dell'area dove risiede la stazione di 0.4 cm/anno.

### **I dati SAR**

Per questo studio sono state utilizzate 200 immagini della costellazione di satelliti Sentinel-1A/B per il periodo da Marzo 2015 a Maggio 2019. Le immagini sono state acquisite in modalità discendente (track 168), in banda C (5,6 cm di lunghezza d'onda) e co-polarizzazione verticale (VV). L'elaborazione dei dati per il calcolo delle velocità medie e delle serie temporali degli spostamenti è avvenuta tramite la tecnica Permanent Scatterer (PS) (Ferretti et al., 2001) similmente a quanto fatto in precedenti lavori (e.g. Fiaschi et al., 2017, 2018).

Nell'edificato di Patigno sono stati ottenuti, tramite tecnica PS, 390 punti di misura. Tutti i punti indicano un movimento nella direzione di scivolamento del fenomeno di dissesto. I valori delle velocità misurate vanno da 0.4 cm/anno a 1.7 cm/anno con un valore medio di 1 cm/anno. Il quadro cinematico mostra le velocità più basse (fino a 0.8 cm/anno) nell'area limitrofa alla zona di distacco del corpo franoso, mentre quelle più elevate sono state registrate verso il piede del dissesto. Questi risultati sono in linea con quelli ottenuti sulla stessa area di frana in un lavoro precedente (Del Soldato et al., 2019).

### **Conclusioni**

L'utilizzo della fotogrammetria digitale multi-temporale d'archivio integrata con i dati GNSS di una stazione permanente e quelli derivanti dall'elaborazione di

immagini SAR, ha permesso di monitorare le deformazioni superficiali della frana di Patigno: la media delle velocità superficiali, stimata dal confronto delle coordinate di punti omologhi distribuiti sul corpo di frana, risulta coerente con le velocità osservate dalla stazione GNSS presente all'interno del corpo di frana e assume un valore di 3.5 cm/anno, lungo la direzione di massima pendenza. Lo studio conferma che la combinazione di osservazioni GNSS in continuo, l'elaborazione di rilievi aero-fotogrammetrici storici e di immagini SAR più recenti può contribuire a comprendere meglio le dinamiche di frane complesse ed importanti come quella di Patigno sopra la quale si trova l'intero abitato dell'omonima frazione.

### **Bibliografia**

- Baldi P., Cenni N., Fabris M., Zanutta A. (2008), "Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data", *Geomorphology*, 102: 435-444, doi: 10.1016/j.geomorph.2008.04.027
- Chandler J.H., Cooper M. (1988), "The extraction of positional data from historical photographs and their application in geomorphology", *Photogrammetric Record*, 13, 73: 69-78
- Del Soldato M., Solari L., Poggi F., Raspini F., Tomás R., Fanti R., Casagli N. (2019), "Landslide-Induced Damage Probability Estimation Coupling InSAR and Field Survey Data by Fragility Curves", *Remote Sensing*, 11, 1486, doi:10.3390/rs11121486
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001), "Permanent scatterers in SAR interferometry", *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1): 8-20.
- Fiaschi S., Mantovani M., Frigerio S., Pasuto A., Floris M. (2017), "Testing the potential of Sentinel-1A TOPS interferometry for the detection and monitoring of landslides at local scale (Veneto Region, Italy)", *Environmental Earth Sciences*, 76: 492, doi: 10.1007/s12665-017-6827-y
- Fiaschi S., Fabris M., Floris M., Achilli V. (2018), "Estimation of land subsidence in deltaic areas through differential SAR interferometry: the Po River Delta case study (Northeast Italy)", *International Journal of Remote Sensing*, 39, 23: 8724-8745, doi: 10.1080/01431161.2018.1490977