

## **ANALISI MULTI-TEMPORALE DELLE VARIAZIONI SUPERFICIALI DI UN CORPO DI FRANA MEDIANTE LA FOTOGRAMMETRIA D'ARCHIVIO E L'ANALISI DI SERIE TEMPORALI GPS**

Paolo BALDI (\*), Nicola CENNI (\*), Massimo FABRIS (\*\*), Antonio ZANUTTA (\*\*\*)

(\*) Dipartimento di Fisica – Settore Geofisica, Università di Bologna, e-mail: p.baldi@unibo.it, nicola.cenni@unibo.it

(\*\*) Laboratorio di Rilevamento e Geomatica – DAUR – Università di Padova, e-mail: massimo.fabris@unipd.it

(\*\*\*) DISTART – Università di Bologna, e-mail: antonio.zanutta@mail.ing.unibo.it

### **Riassunto**

L'evoluzione della frana di Patigno, localizzata nell'Appennino settentrionale (Massa Carrara), è stata analizzata utilizzando la fotogrammetria d'archivio ed osservazioni GPS di una stazione permanente presente all'interno del corpo di frana. Le immagini fotogrammetriche, acquisite nel 1975, 1987 e 2004 sono state co-registrate nello stesso sistema di riferimento utilizzando il metodo basato sull'identificazione di punti omologhi nei modelli multi-temporali. Dall'analisi stereoscopica sono stati determinati 293 vettori spostamento all'interno della frana. La velocità di movimento della stazione GPS (circa 3.4 cm/anno dal 2004) è risultata congruente con la variazione media ottenuta dall'analisi fotogrammetrica. È stato osservato che la velocità stimata varia stagionalmente fra 1 e 6 cm/anno e che il movimento della frana è ragionevolmente influenzato da fattori idrologici.

### **Abstract**

The evolution of the Patigno landslide, a deep-seated gravitational slope deformation in the Northern Apennine (Massa Carrara), was investigated using archival photogrammetry and GPS observations from a permanent station located inside the landslide. Historical aerial photographs of the area taken in 1975, 1987 and 2004 were co-registered into the same reference frame using the method based on the detection of homologous points in multi-temporal models. The displacement vectors of 293 points in the landslide were determined. The average movement velocity of the GPS station since 2004 (about 3.4 cm/yr) agrees with the mean displacement rate obtained from photogrammetry. Furthermore, the estimated velocity varies seasonally between 3 and 6 cm/yr. This variability correlated with rainfall suggests that the creep of the landslide is influenced by hydrological factors.

### **Introduzione**

Una delle metodologie più efficaci per la produzione di modelli digitali del terreno (DTM – *Digital Terrain Model*), che permettono la ricostruzione 3D della superficie del terreno, è costituita dalla fotogrammetria digitale. I DTM possono essere utilizzati per effettuare analisi morfologiche della superficie del terreno: accurati modelli acquisiti periodicamente su un'area caratterizzata da significative variazioni morfologiche vengono utilizzati per valutarne le deformazioni superficiali (Kääb et al., 1997; Bitelli et al., 2004; Baldi et al., 2005; Zanutta et al., 2006; 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 50-60 anni. Nell'elaborazione di immagini storiche viene utilizzato il metodo

conosciuto come fotogrammetria d'archivio per estrarre informazioni metriche dalle foto aeree (Chandler, Cooper, 1988). In questo lavoro vengono presentati i risultati del monitoraggio delle deformazioni superficiali di una frana mediante le osservazioni di una stazione GPS permanente (interna alla frana ed operativa dal gennaio 2004) ed analisi di rilievi aero-fotogrammetrici effettuati nel 1975 (1:13000), 1987 (1:13000) e 2004 (1:30000). Il cinematismo della stazione GPS, a risoluzione giornaliera, e gli spostamenti di alcune centinaia di punti distribuiti sul corpo di frana, permettono di stimare una variazione media di circa 3.4 cm/anno e di determinare cambiamenti di velocità stagionali che sono stati correlati con i dati delle stazioni pluviometriche.

### Elaborazione dei dati fotogrammetrici

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

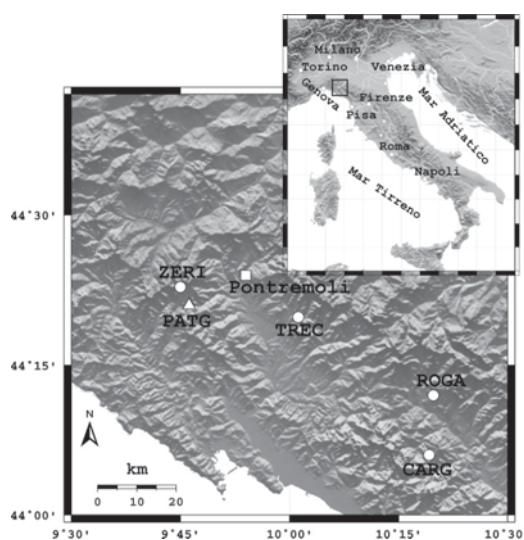


Figura 1 – Localizzazione della frana di Patigno; posizione della stazione GPS permanente di Patigno (triangolo, PATG) e di altre 4 stazioni permanenti (cerchi) Zeri (ZERI), Treschietto (TREC), San Romano in Garfagnana (ROGA), Careggine (CARG), utilizzate come riferimento. La posizione della stazione pluviometrica di Pontremoli è indicata dal simbolo quadrato

La determinazione delle variazioni superficiali della frana nell'arco degli ultimi 30 anni è stata effettuata mediante 3 rilievi aero-fotogrammetrici realizzati nel 1975 (1:13000), 1987 (1:13000) e 2004 (1:30000): le diapositive 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. Le immagini del 1987 e 2004 sono caratterizzate da una scarsa visibilità a terra a causa della copertura vegetale: al contrario, invece, le immagini del 1975 presentano una buona visibilità al suolo su tutta l'area di frana permettendo quindi di estrarre DTM automatici accurati con il software *Socet Set*© versione 5.3. Per ottenere il sistema di riferimento comune ai 3 rilievi, sono stati identificati sulle immagini punti naturali ed artificiali comuni, localizzati esternamente all'area di frana (e quindi supposti stabili); le coordinate di questi punti, utilizzati come punti fotografici d'appoggio, sono state misurate sulla CTR (Carta Tecnica Regionale) in scala 1:5000 ottenuta proprio dallo stesso rilievo aero-fotogrammetrico del 1975 utilizzato in questo studio. Dopo aver ottenuto i modelli stereoscopici e verificato la stabilità del sistema di riferimento (Baldi et al., 2008), sono stati estratti 3 DTM automatici con griglia di passo 5 m su un'area che comprende la frana e le porzioni circostanti. L'*editing* manuale è stato necessario per adattare le curve di livello alla reale morfologia del terreno nelle zone di scarsa correlazione, in quelle urbane e nelle aree vegetate. Il confronto tra i DTM fornisce le variazioni di massa nel periodo analizzato: in questo caso, tuttavia, l'errore di co-registrazione genera un errore sistematico dello stesso ordine di grandezza della massa totale coinvolta nel processo deformativo (Baldi et al., 2008). Per analizzare le variazioni della frana di Patigno è stato utilizzato quindi 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 ed affioramenti rocciosi): dal confronto delle coordinate relative sono stati ottenuti vettori spostamento 3D nei due periodi 1975/1987 e 1987/2004. Data la copertura vegetale, i punti sono stati misurati quasi esclusivamente nelle aree edificate di Patigno, Noce e Val di Termine e limitatamente su edifici isolati. Per ottenere una descrizione continua dell'evoluzione cinematica della superficie della frana, i vettori sono stati interpolati sull'intero corpo di frana utilizzando l'algoritmo di interpolazione di *Kriging* (figura 2).

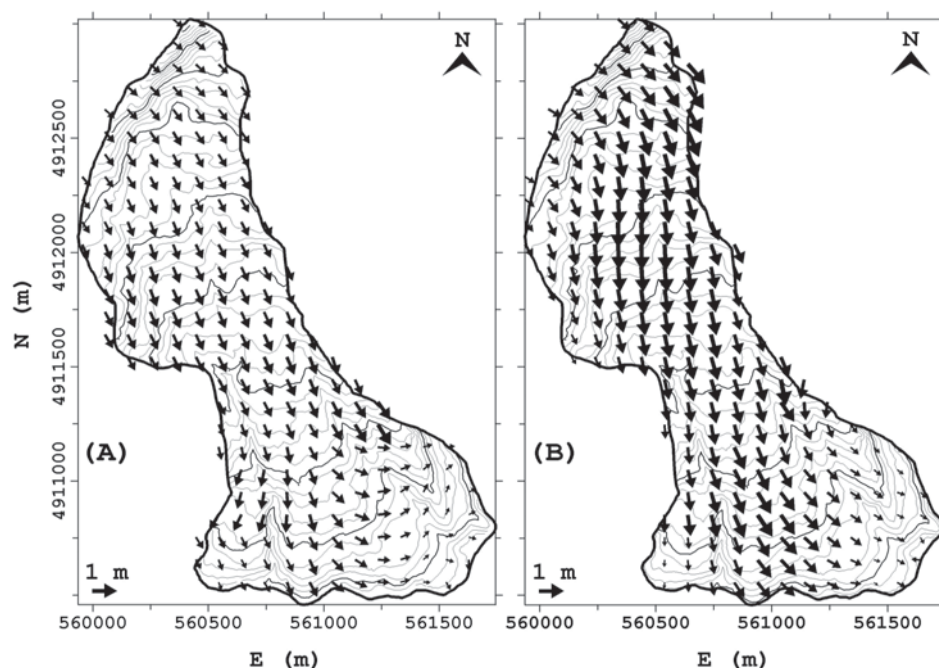


Figura 2 – Risultato dell'interpolazione mediante l'algoritmo di Kriging dei vettori spostamento di punti situati all'interno dell'area di frana: i vettori sono stati ottenuti dal confronto tra le coordinate di punti omologhi nei periodi 1975/1987 (A) e 1987/2004 (B)

### Controllo geodetico della frana

Il movimento del settore centrale della frana a partire dal gennaio 2004 è stato monitorato utilizzando una stazione GPS permanente ubicata sul tetto del palazzo comunale situato al centro dell'abitato di Patigno. Le osservazioni giornaliere, con passo di campionamento a 30 secondi di questa stazione denominata PATG (figura 1) sono state integrate con i dati di altre 4 stazioni permanenti (CARG, ROGA, TREC e ZERI, figura 1) situate all'esterno dell'area interessata dal movimento franoso, come risulta dall'analisi dei loro movimenti relativi, che forniscono valori trascurabili (Cenni et al., 2008). Le osservazioni giornaliere di queste cinque stazioni permanenti sono state analizzate utilizzando il software *Gamit*© versione 10.33; le diverse soluzioni giornaliere sono state allineate nel medesimo sistema di riferimento assumendo fisse le coordinate della stazione ROGA. Le posizioni giornaliere di ogni stazione sono state utilizzate per ricavare una posizione mediata sull'arco temporale di una settimana con semplice media aritmetica. Questo ha permesso di ridurre il rumore numerico nelle serie temporali della posizione di ogni singola stazione e quindi di evidenziare con maggiore precisione un'eventuale variazione significativa nella posizione. Mediante un semplice approccio ai minimi quadrati sono state stimate le velocità medie con cui le singole stazioni si spostano nell'arco di un anno ed il relativo scarto quadratico medio (tabella 1).

Sigla	T	V <sub>n</sub>	V <sub>e</sub>	V <sub>q</sub>	RMS <sub>n</sub>	RMS <sub>e</sub>	RMS <sub>q</sub>
CARG	4.46	0.0 ± 0.3	0.5 ± 0.2	0.8 ± 1.5	0.8	0.5	2.8
PATG	4.46	-29.8 ± 0.6	15.9 ± 0.5	-2.0 ± 1.9	2.5	2.2	6.1
TREC	4.46	0.7 ± 0.3	0.0 ± 0.3	-1.4 ± 1.5	1.1	0.9	3.1
ZERI	2.81	-0.2 ± 0.6	-0.3 ± 0.7	3.3 ± 2.5	1.6	1.7	3.9

Tabella 1. Velocità (mm/anno), relativa incertezza e scarto quadratico medio (RMS, mm) delle coordinate Nord (n), Est (e) e quota ellissoidica (q) di ciascuna stazione, ricavate utilizzando la serie temporale delle coordinate della posizione settimanale delle diverse stazioni GPS presenti nella rete (figura 1). T (anni) indica l'intervallo di tempo in cui la stazione è stata operativa. I valori della stazione ROGA non compaiono nella tabella, essendo questa stazione presa come riferimento

Le incertezze relative alle diverse velocità sono state stimate utilizzando il metodo proposto da Dixon et al., 2000. I valori contenuti dello scarto quadratico medio ottenuti per ciascuna componente indicano che le stazioni analizzate non sono affette da particolari disturbi locali che, in caso contrario, ne aumenterebbero il valore. I risultati ottenuti indicano una sostanziale stabilità delle altre stazioni di riferimento (CARG, TREC e ZERI) rispetto alla stazione di ROGA, con velocità relative inferiori al mm/anno sia per quanto riguarda le componenti planimetriche (Nord ed Est) che la componente altimetrica (Quota), confermando l'ipotesi che i movimenti relativi tra questi siti siano trascurabili.

### Analisi del movimento della frana di Patigno

Dalla stima ai minimi quadrati ricavata dai dati della stazione di Patigno (tabella 1, figura 3) si desume che il movimento franoso nel settore ove è ubicata la stazione risulta essere non trascurabile, ma caratterizzato da una componente planimetrica di circa 3.4 cm/anno in direzione Sud-Est ed una diminuzione della quota ellissoidica di circa 2 mm/anno (figura 3), con un'inclinazione del movimento, rispetto alla verticale, di circa 5°, compatibile con la pendenza media della superficie topografica nella zona coinvolta dal movimento franoso. Il risultato ottenuto dal monitoraggio geodetico è in accordo con la stima eseguita utilizzando la tecnica fotogrammetrica nella medesima area su un periodo più lungo; ciò indica un movimento continuo del corpo di frana.

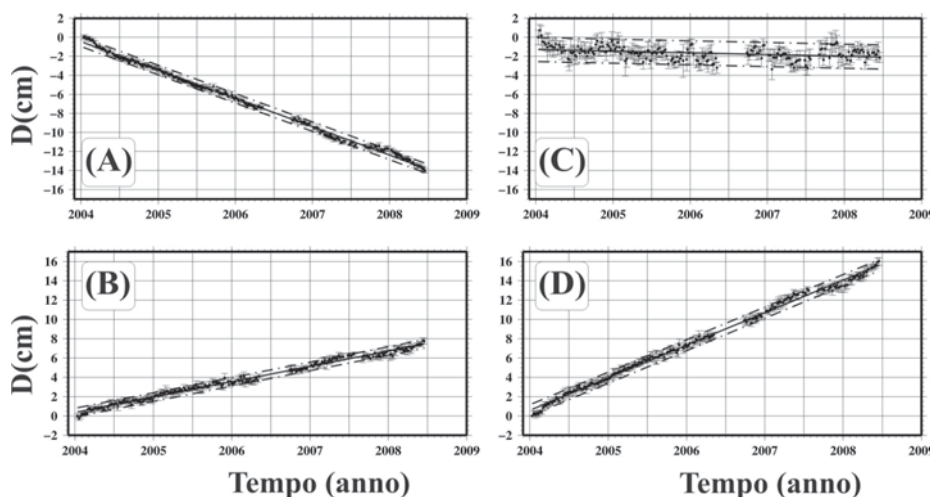


Figura 3 – Serie temporali settimanali delle coordinate Nord (A), Est (B), Quota (C) e della componente planimetrica (D) della posizione della stazione di Patigno. La linea continua indica il valore della velocità media stimata utilizzando tutte le osservazioni settimanali. La componente planimetrica

è stata ottenuta mediante la somma in quadratura dei valori delle coordinate Nord ed Est. L'area delimitata dalle due linee tratteggiate indica l'intervallo di confidenza pari a 2 volte la dispersione della serie (scarto quadratico medio)

Allo scopo di evidenziare possibili movimenti periodici o improvvise accelerazioni del movimento del fenomeno franoso, è stata analizzata con particolare attenzione la variazione della posizione della stazione GPS di Patigno. In particolare, le serie temporali della componente GPS planimetrica e verticale sono state analizzate utilizzando il metodo della “velocità mobile”, simile al metodo della “media mobile”. La velocità del movimento franoso è stata determinata utilizzando solo i dati compresi in una finestra di n settimane. Successivamente, lasciando inalterata la dimensione della finestra, questa è stata spostata di una unità di tempo (nel nostro caso 1 settimana) e calcolato un nuovo valore di velocità, fino a quando non è stato esaminato l'intero periodo a disposizione. Nel nostro caso, abbiamo esaminato l'evoluzione delle componenti planimetrica e verticale con finestre di diverse dimensioni; nella figura 4 viene riportato il risultato ottenuto considerando una finestra di 20 settimane, escludendo le stime di velocità eseguite con meno di 10 osservazioni nell'arco di quel periodo, per garantire che le diverse velocità stimate abbiano la stessa significatività statistica.

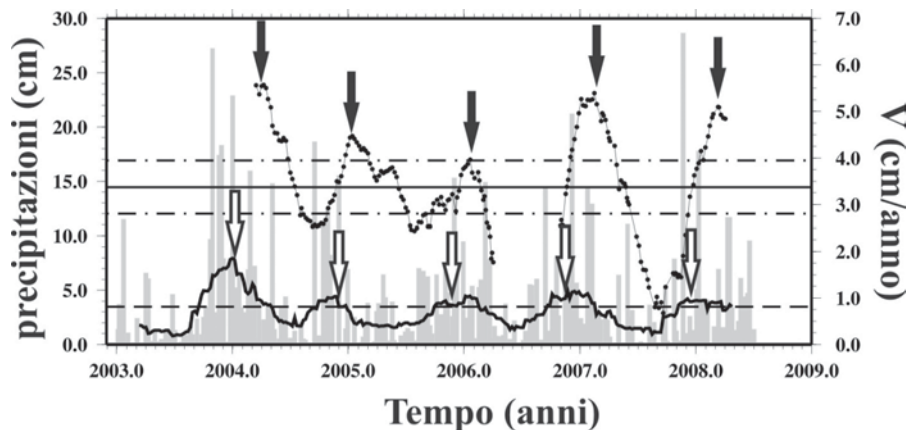


Figura 4 – Serie temporali della “velocità mobile planimetrica” ottenuta utilizzando le misure relative a 20 settimane della componente planimetrica e rigettando le stime eseguite con meno di 10 settimane di dati. La linea continua orizzontale indica il valore della velocità a lungo periodo della componente planimetrica. Le due rette tratteggiate individuano un’area pari a 2 volte la dispersione delle serie (intervallo di confidenza al 95%). L’istogramma illustra l’andamento temporale della piovosità settimanale registrata nella stazione pluviometrica di Pontremoli, la linea continua indica l’andamento medio della piovosità stimato utilizzando il metodo della “media mobile” con una finestra di 20 settimane, rigettando le medie ottenute con meno di 10 settimane. Le frecce bianche individuano i massimi di piovosità media mentre quelle nere indicano i massimi della velocità planimetrica

La figura 4 mostra che la velocità subisce delle oscillazioni significative con valori che vanno da circa 1 a 6 cm/anno con i massimi in corrispondenza del periodo invernale (gennaio/febbraio). Queste variazioni nella velocità di spostamento del fenomeno franoso potrebbero essere correlate con l’andamento nel tempo della piovosità nell’area (figura 4), come osservato in diverse zone coinvolte da instabilità gravitative (si veda ad esempio: Borgatti et al., 2006; Zhang et al., 2006). A questo proposito, mancando una stazione pluviometrica sul corpo di frana, sono stati presi in considerazione gli andamenti della piovosità settimanale (figura 4) registrati nella stazione di Pontremoli, localizzata in prossimità dell’area in frana (figura 1). Confrontando l’andamento nel tempo della velocità planimetrica e quello della piovosità, è possibile notare che i massimi di velocità (Frecce Nere, figura 4) sono successivi di circa 1-2 mesi i periodi di massima precipitazione (Frecce Bianche, figura 4). Questo ritardo potrebbe essere dovuto alla lenta infiltrazione dell’acqua piovana, con un graduale aumento della pressione di poro all’interno del corpo di frana, e conseguente riduzione degli attriti lungo la superficie di scorrimento (Zhang et al., 2006). Per tentare di modellare questo meccanismo di attivazione della frana, è stato utilizzato il semplice modello proposto Iverson (2000) che valuta il valore della pressione di poro in risposta alle variazioni cicliche della piovosità. Utilizzando questo modello, la soglia di criticità viene raggiunta ad una profondità di circa 10 metri dopo pochi giorni dall’inizio delle piogge più significative. Questo risultato però non è compatibile con le indicazioni riportate da altri autori (Federici et al., 2002) sulla profondità alla quale è posto un’eventuale piano di scorrimento, e nemmeno con l’intervallo di tempo di ritardo stimato (1-2 mesi). Dai risultati derivanti dalle osservazioni geodetiche possiamo quindi supporre che il movimento osservato della frana di Patigno si riferisce ad uno scorrimento lungo una superficie posta a profondità variabile (dai 10 ai 30 metri) coincidente con la discontinuità fra l’Unità di Canetolo e le argille densamente fratturate individuata tramite sondaggi e prospezioni da Federici ed altri (2002).

## Conclusioni

Sono stati utilizzati tre rilievi aero-fotogrammetrici per valutare l’attività della frana di Patigno negli ultimi decenni. 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 GPS di Patigno: spostamento orizzontale medio di 3.4 cm/anno con azimuth di 150° e componente verticale della velocità di -0.2 cm/anno, compatibile con la topografia della frana che presenta pendenza di circa 10°. Le accurate osservazioni GPS hanno permesso di determinare variazioni stagionali della velocità che, assieme ai risultati dei rilievi fotogrammetrici, sembrano essere direttamente correlate all'idrologia del sito. E' stato applicato un modello, basato sul lavoro di Iverson (2000), per stimare gli effetti dell'infiltrazione delle piogge sull'innescò, sui tempi e sulla profondità della frana. Si è osservato un ritardo di 1-2 mesi tra le piogge ed il picco di velocità, supportando l'ipotesi che la superficie che scivola e che fornisce il movimento superficiale sia quella profonda. Lo studio conferma che la combinazione di osservazioni GPS in continuo, analisi di dati pluviometrici e l'elaborazione di rilievi aero-fotogrammetrici storici può contribuire a comprendere meglio le dinamiche di frane complesse. Il ritardo tra l'inizio della stagione piovosa e l'accelerazione del movimento della frana fa ipotizzare un movimento radicato probabilmente con una superficie di scivolamento nella parte più alta del basamento roccioso con una velocità media di deformazione di circa 3.4 cm/anno.

### Bibliografia

- Baldi P., Fabris M., Marsella A., 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 and Remote Sensing*, 59, 4: 199-211
- Baldi P., Cenni N., Fabris M., Zanutta A. (2008), "Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data", *Geomorphology*, doi: 10.1016/j.geomorph.2008.04.027
- Bitelli G., Dubbini M., Zanutta A. (2004), "Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry techniques to monitor landslide bodies", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Organising Committee of the XX<sup>th</sup> International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing*, Istanbul, XXXV, B: 246-251
- Borgatti L., Corsini A., Barbieri M., Sartini G., Truffelli G., Caputo G., Pugliesi C. (2006), "Large reactivated landslides in weak rock masses: a case study from the Northern Apennines (Italy)", *Landslides*, 3: 115-124
- Cenni N., Baldi P., Mantovani E., Ferrini M., Viti M., D'Intinosante V., Babbucci D., Albarello D. (2008), "Short-term (geodetic) and long-term (geological) deformation pattern in the Northern Apennines", *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 127, 1, in press
- 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
- Dixon T.H., Miller M., Farina F., Wang H., Johnson D. (2000), "Present-day motion of the Sierra Nevada block and some tectonic implications for the Basin and Range province, North American Cordillera", *Tectonics*, 19, 1: 1-24
- Federici P.R., Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Ribolini A., Verani M., Chelli A. (2002), "The large landslide of Patigno (Northern Apennines, Italy): geological, geomorphological and geognostic integrated analysis", *First European Conference on Landslides*, Balkema, A.A., Prague, Czech Republic, 1: 547-552
- Kääb A., Haeberli W., Gudmundsson G.H. (1997), "Analysing the creep of mountain permafrost using high precision aerial photogrammetry: 25 years of monitoring Gruben Rock glacier, Swiss Alps", *Permafrost and Periglacial Process*, 8: 409-426
- Iverson R.M. (2000), "Landslide triggering by rain infiltration", *Water Resources Research*, 36, 7: 1897-1910
- Zanutta A., Baldi P., Bitelli G., Cardinali M., Carrara A. (2006), "Qualitative and quantitative photogrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis", *Annals of Geophysics*, 49: 1121-1134
- Zhang W.J., Chen Y.M., Zhan L.T. (2006), "Loading/unloading response ratio theory applied in predicting deep-seated landslides triggering", *Engineering Geology*, 82: 234-240