

## CAMBIAMENTI DELL'USO DEL SUOLO E AUMENTO DELL'ATTIVITÀ FRANOSA NEL TERRITORIO DI ROCCHETTA SANT'ANTONIO (APPENNINO DAUNO)

Caterina Lamanna<sup>1</sup>, Domenico Casarano<sup>1</sup> & Janusz Wasowski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CNR-IRPI (Bari), e-mail: cate.lama@tiscali.it

**RIASSUNTO:** Lamanna C. et al., *Cambiamenti dell'uso del suolo e aumento dell'attività franosa nel territorio di Rocchetta Sant'Antonio (Appennino dauno)*. (IT ISSN 0394-3356, 2009).

Sono state studiate le variazioni dell'attività franosa nell'intero territorio comunale di Rocchetta Sant'Antonio (Appennino dauno), nel periodo 1976-2006. La mappatura dei fenomeni franosi è stata condotta facendo principalmente uso di foto aeree e di immagini satellitari ad alta risoluzione (IKONOS). Le fotografie aeree sono state analizzate in modalità stereoscopica, mentre l'immagine IKONOS, dopo il pan-sharpening e l'ortorettificazione, è stata sovrapposta al DTM e visualizzata in tre dimensioni. Dallo studio è emerso che la frequenza spaziale delle frane attive nel 2006 è del 160% più alta che all'inizio del periodo di studio, sebbene i dati pluviometrici assumano valori confrontabili nelle due date. Dopo il 1976, anno in cui la CEE stabilì di concedere incentivi per ogni ettaro di terreno coltivato a grano duro, si è peraltro verificato un incremento di circa il 46% nell'estensione areale del seminativo, soprattutto per le coltivazioni cerealicole. Pertanto la più alta suscettibilità alle frane può essere legata al cambio di uso del suolo; infatti i massimi valori assoluti di densità delle frane attive si sono osservati sui terreni divenuti agricoli dopo il 1976 ("nuovo seminativo"), e sui seminativi si è osservato un incremento della franosità nettamente maggiore rispetto alle aree mai coltivate. I terreni divenuti coltivati dopo il 1976 erano già a quella data più franosi dei terreni già seminati. Inoltre l'aumento della franosità sul nuovo seminativo è dovuto all'estensione delle colture cerealicole e foraggere su terreni con pendenza mediamente superiore a quella dei terreni già coltivati: il vecchio seminativo era per il 25% su pendenze superiori ai 10° e quasi mai oltre i 15°, mentre il nuovo seminativo è per il 45% su pendenze oltre i 10° e per quasi il 10% oltre i 15°. Le coltivazioni su pendenze elevate, marginali nel 1976, hanno finito per riguardare porzioni significative del territorio. Quindi, l'incremento delle frane attive è da attribuirsi, almeno in parte, all'estensione delle coltivazioni su terreni più ripidi e già intrinsecamente meno stabili prima di essere coltivati. D'altra parte, le precipitazioni superiori alla media negli inverni tra il 2003 e il 2006, con l'occorrenza di eventi intensi, sono il principale fattore causativo/innescante dei più recenti movimenti franosi. I risultati di questo studio suggeriscono che per pendii profondamente modificati dall'uomo negli ultimi decenni, si deve considerare l'effetto combinato delle variazioni climatiche e dell'uso del suolo per evitare il rischio di sovrastimare l'impatto sulla franosità del solo aspetto climatico.

**ABSTRACT:** Lamanna C. et al., *Land use change and increase in landslide activity in the Rocchetta S. Antonio area (Daunia Apennines)*. (IT ISSN 0394-3356, 2009)

*We examine temporal variations in landslide activity in the context of land use changes and precipitation characteristics in the north-western part of the Apulia Region (Southern Italy). The period considered is from 1976 to 2006. The main study area (72 km<sup>2</sup>) includes the municipal territory of Rocchetta S. Antonio (FG), assumed to be a representative portion of the Daunia Apennines.*

*Despite the moderate elevation (from 250 to about 1000 m), the Daunia mountains are known for their susceptibility to landsliding, with rainfall events and unwise man activity being the main triggering/causative factors. Only the steepest, highest elevation areas include a significant percentage of arboreous land. Elsewhere, especially where clay-rich units predominate, the vegetation cover is represented mainly by cultivated land (cereals) and locally by grass land.*

*The Rocchetta S. Antonio territory is distant only few tens of km from the Adriatic coast, and, as the entire Daunia region, is characterized by a Mediterranean semiarid (sub-Apennine) climate with total annual rainfall that typically varies from 600 to 750 mm.*

*The clay-rich flysch formations are widespread in Daunia and that makes slopes susceptible to landsliding. The presence of intensely deformed geological units is another factor predisposing to instability.*

*To investigate the differences between historical (1976) and recent (2006) landsliding we first compiled two landslide activity maps. The 1976 landslide inventory was obtained through a systematic interpretation of 1:25000 scale aerial photographs and the 2006 inventory was based on the interpretation of high resolution (1 m pixel) IKONOS satellite imagery. For simplicity a distinction was made only between active and inactive landslides. We followed the geomorphic criteria typically adopted for the recognition of landslides and their state of activity from air-borne imagery. To facilitate the interpretation the satellite imagery was first orthorectified and pan-sharpened. Then natural colour imagery was draped over a detailed DTM (with 5 m grid size) generated from recent topographic maps at 1:5000 scale. For comparative analysis the information on landslides was presented by quantifying area frequency of landslides (percentage of the total study area occupied by landslides) and their density (number of landslides per km<sup>2</sup>). In particular, the comparison of the 1976 and 2006 landslide inventories shows large increase in number of active landslides (from 5.7/km<sup>2</sup> to 34.4/km<sup>2</sup> in terms of density), which corresponds to 160 % increase in aerial frequency.*

*To assess land use change occurred in the same 30 year period we used again 1976 aerial photos and produced a map of historical land use. A map of recent land use was prepared using ASTER satellite imagery. This imagery was preferred over IKONOS data, because the acquisition period of the ASTER imagery (summer, after harvest) resulted more suitable for land use classification based on automatic supervised procedure. The following three major groups or classes were distinguished: i) agricultural land (sown fields with mainly cereal cultivation ploughing), which represents by far the predominant group ii) arboreous land, including dense shrub and iii) other (including uncultivated and bare land, grass land, pasture, and man-made). The selection of these three groups was driven by the presence of few predominant classes of land cover and land use, as well as by their potential impact on shallow landsliding.*

*To quantify the temporal variations in land use from 1976 to 2000 the map data were expressed as percentage of areal frequency. The results show that about 52% of the land has been used as sown fields in the seventies and that by the year 2000 the percentage increased to 75%.*

*The influence of the land use change on mass movement activity is evident when considering the distributions of active landslides on sown fields. In particular, the results demonstrate that the recent (2006) very high density (7.6%) of active landslides in the areas that have become sown after 1976 (new sown) can be linked to the originally high susceptibility of those areas to landsliding (2.9%), excee-*

ding even the area frequency of failures in the fields already sown in 1976 (old sown, 1.8%). In fact, new cultivated land, which is on steeper slopes than older fields, had a landslide density 55% higher than did the older fields in 2006. Furthermore, the increase in the frequency of active landsliding observed on both old and new sown fields has been greater than elsewhere (remaining areas). All this demonstrates that land use changes occurred between 1976 and 2006, and in particular the increases in the areal extent of sown fields, have negative influence on the stability of slopes in the study area.

Clearly, the frequency of slope failures in time results from an interaction of many variables, and it is well known that the most significant temporal controls are often those related to rainfall-induced processes. Although relations between climatic events and landslide occurrence can be very complex, our field observations indicated that in Daunia highest landslide activity typically occurs in late winter time. Indeed, the majority of shallow slope failures registered in 2006 were triggered by late February and March rainfalls that followed a wet winter period. A comparison of the precipitation characteristics in 1976 and 2006 did not show major differences. In particular, by taking into account potential evapotranspiration in the months preceding the two landslide inventorying periods we demonstrate that potential water input to the soil differed by about 20%.

In summary, the results of this work demonstrate clear relations between the land-use changes in the period 1976-2006 and the recent high landslide activity. We thus stress that for hillslope areas profoundly altered by man in the recent decades, the effects of changes in both land use and rainfall patterns have to be considered to avoid a risk of overestimating (or underestimating) the relative impact of climate change or variability on landslide activity.

Parole chiave: frane attive, uso del suolo, Appennino dauno, IKONOS.

Keywords: active landslides, land use, Daunia Apennines, IKONOS.

## 1. INTRODUZIONE

È noto che i cambiamenti di uso del suolo possono influenzare l'instabilità dei pendii su scala locale e regionale, ma si riconosce anche che i loro effetti sono spesso scarsamente compresi e difficili da quantificare (ad es. GOSTELOW & WASOWSKI, 2004). Nelle regioni montuose popolate, le frane superficiali spesso sono prodotte dall'interazione tra l'ambiente e l'azione antropica e molti studi hanno mostrato un'evidente relazione tra l'uso del suolo e la stabilità dei versanti (ad es. DEGRAFF & CANUTI, 1988; BEGUERIA, 2006). In particolare, il disboscamento, gli incendi e le coltivazioni sulle colline sono considerati i più significativi fattori predisponenti (SIDLE *et al.*, 1985; CANNON, 2000). Le aree con vegetazione fitta sono meno suscettibili ai movimenti di versante rispetto a quelle con vegetazione sparsa (GOKCEOGLU & AKSOY, 1996). Secondo SELBY (1993), gli alberi che ricoprono le colline aumentano la resistenza al taglio dei suoli per circa il 60%. MEHROTRA *et al.* (1996) hanno mostrato che l'attività delle frane aumenta di circa il 15% dove la copertura della vegetazione originale è stata eliminata o alterata.

In questo lavoro sono studiate le relazioni tra i fattori ambientali dinamici (cambiamenti di uso del suolo e precipitazioni) e l'attività franosa nei Monti Dauni. A dispetto del moderato rilievo e della piovosità annuale relativamente bassa, i Monti Dauni sono noti per la loro suscettibilità al dissesto franoso (ad es. COTECHIA, 1963). La regione ha subito una considerevole deforestazione negli ultimi secoli e questo può avere predisposto condizioni di diffusa franosità nelle aree rurali (ad es. PARISE & WASOWSKI, 2000).

In particolare, sono state studiate le variazioni storiche dell'attività franosa occorse dal 1976 al 2006, nel territorio comunale di Rocchetta Sant'Antonio, nell'Appennino dauno (Fig. 1). Il 1976 è una data chiave, in quanto la CEE in quell'anno stabilì di concedere un aiuto per ogni ettaro di terreno coltivato a grano duro (regolamento (CEE) n. 1143/76). Il regolamento ha favorito l'aumento della superficie destinata alla cerealicoltura e la Puglia è diventata la principale produttrice di grano duro in Italia (CONFORTI, 2002).

Importanti sono anche le trasformazioni che hanno subito le tecniche di lavorazione dei terreni accli-

vi con la diffusione delle macchine agricole, in seguito agli incentivi della CEE. Con i mezzi meccanici moderni, si raggiungono profondità di aratura di 55-60 cm, si forma la "soletta di lavorazione" (pellicola a bassa permeabilità sotto lo strato lavorato) e di conseguenza si ha un rallentamento della percolazione dell'acqua e un ristagno a livello della soletta di lavorazione che favorisce lo slittamento dello strato sovrastante smosso dall'aratura (GISOTTI & ZARLENGA, 2004).

Il territorio di Rocchetta, prevalentemente rurale, è noto per i ricorrenti problemi di frane e può pertanto essere considerato come porzione rappresentativa dei Monti Dauni. Vi è evidenza di un incremento della franosità negli ultimi anni e, sebbene manchino studi dettagliati, è opinione comune tra la popolazione locale che una parte di responsabilità sia da attribuire ai cambiamenti climatici.

È noto che la suscettibilità al dissesto non è semplice da mappare e modellizzare, anche quando i fattori fisici che la controllano sono conosciuti relativamente bene. Pertanto, per dimostrare l'influenza delle precipitazioni e dell'uso (e copertura) del suolo sulla franosità, si sono ottenute le mappe delle frane e di uso del suolo per due date diverse (1976 e 2006). La variazione nell'attività franosa documentata nei 30 anni considerati è stata analizzata anche tenendo conto dell'andamento delle precipitazioni negli ultimi decenni.

L'analisi dei cambiamenti di uso del suolo nell'area di studio è essenziale per un'esatta comprensione del motivo per cui, nel periodo esaminato, il problema della stabilità dei versanti si sia aggravato. Particolare attenzione è stata prestata alle attività antropiche, specialmente alle pratiche agricole, e alle precipitazioni, non solo perché anche in tempi brevi queste possono subire variazioni significative nello spazio e nel tempo, ma anche perché è stato riconosciuto che i cambiamenti di uso del suolo rappresentano un fattore importante che influenza lo sviluppo di frane indotte dalle precipitazioni (GLADE, 2003). Oltre ai fattori dinamici (uso del suolo e piovosità), si sono considerati alcuni fattori geologici e geomorfologici che, anche se praticamente costanti nell'arco di tempo esaminato, possono dare ulteriori informazioni circa la comprensione dei processi che regolano la stabilità dei pendii nell'area di studio.

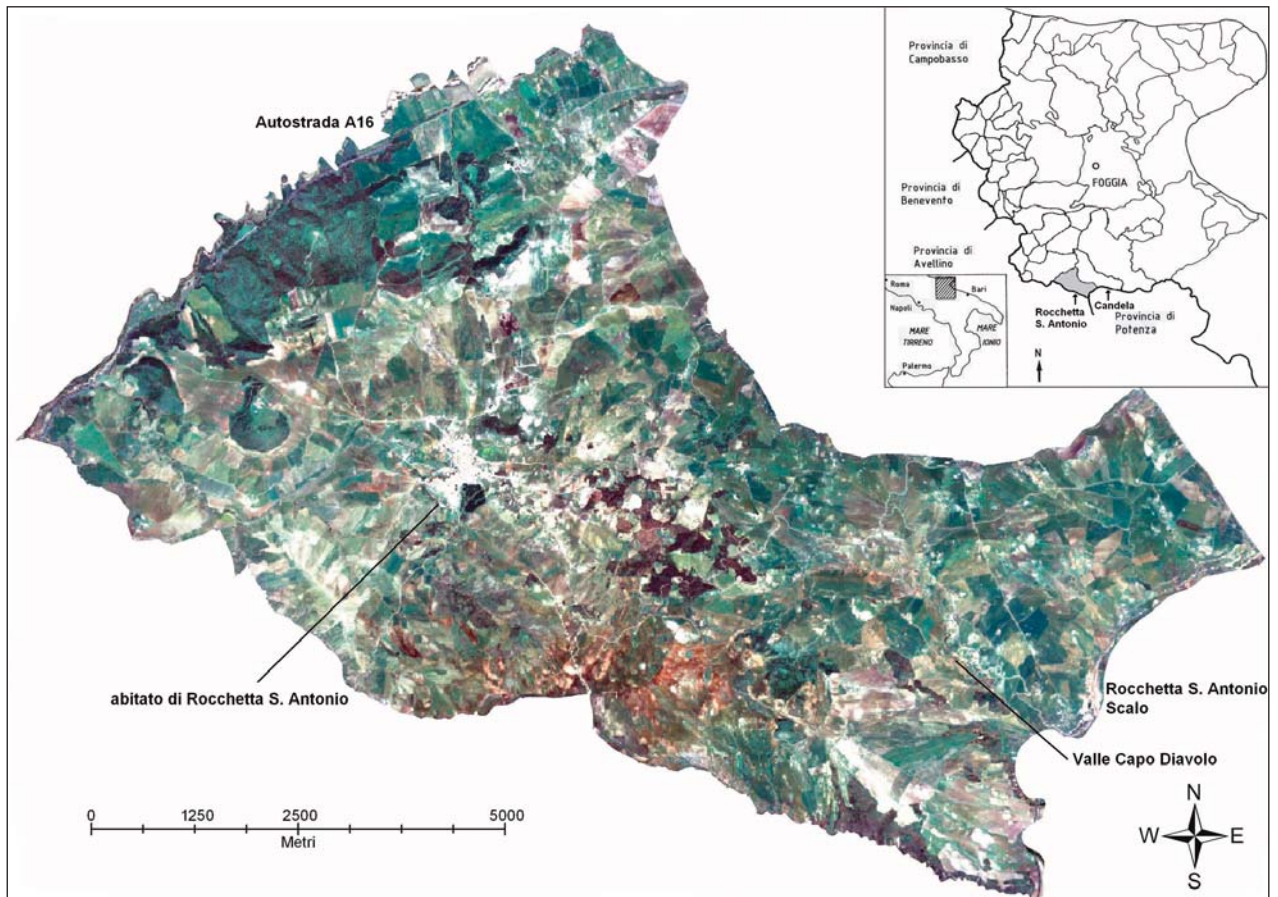


Fig. 1 - Immagine da satellite ad alta risoluzione del territorio comunale di Rocchetta Sant'Antonio. Si nota l'uso del suolo prevalentemente agricolo (il riquadro mostra l'ubicazione dell'area di studio in Italia meridionale).

*High resolution satellite image of Rocchetta S. Antonio. Note predominantly agricultural land use (inset shows location in southern Italy).*

## 2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOLOGIA E FRANOSITÀ

### 2.1 Inquadramento geologico e geomorfologico generale

L'area presa in esame presenta quote variabili tra 170 e 770 metri s.l.m. e comprende il territorio comunale di Rocchetta Sant'Antonio, paese di modeste dimensioni, posto sulla sommità di un piccolo rilievo dell'Appennino dauno.

L'Appennino dauno appartiene all'area di transizione tra la parte più orientale della catena appenninica, ricadente nella provincia di Foggia, e la parte più occidentale dell'avanfossa (Tavoliere della Puglia) (CROSTELLA & VEZZANI, 1964; MOSTARDINI & MERLINI, 1986; DAZZARO *et al*, 1988; CIARCIA *et al.*, 2003). Le unità della catena, che interessano prevalentemente l'area di studio, sono rappresentate da formazioni essenzialmente torbiditiche: "Flysch Rosso" (Cretaceo superiore-Oligocene) e Flysch Numidico (Miocene inferiore) attribuite in gran parte al bacino lagonegrese, e Flysch di Faeto (Miocene medio-superiore) appartenente alle Unità Irpine (DI NOCERA & TORRE, 1987).

Litologicamente il "Flysch Rosso" è costituito da argille grigie o variamente colorate, in strati sottili ed alternati a marne, calcari pulverulenti ed argilliti fogliet-

tate, calcilutiti tipo scaglia, calcareniti con liste di selce e brecciole (DI NOCERA & TORRE, 1987). Su questi terreni giace il Flysch Numidico.

Quest'ultimo è costituito essenzialmente da quarzoareniti e quarzosiltiti di colore grigio, rossastro per alterazione, con sottili intercalazioni di marne argillose varicolori nella parte bassa della successione. A luoghi si osservano arenarie grossolane mal classate, che passano in alto ad arenarie fini e quindi a quarzosiltiti; i livelli di argilla marnosa, per lo più scagliosa, non mostrano una frequenza ritmica (DI NOCERA & TORRE, 1987).

Il Flysch di Faeto è costituito da un'alternanza di calcareniti, calcari marnosi, brecciole con interstrati di marne e argille. La composizione prevalentemente calcarea è dovuta principalmente ad apporti derivanti da una piattaforma carbonatica identificabile con quella apula (DAZZARO & RAPISARDI, 1987). Il Flysch di Faeto poggia con contatto stratigrafico sui livelli sommitali, marnoso-argillosi del "Flysch Rosso"; quasi sempre però il rapporto tra le due unità risulta disarticolato dagli eventi tettonici pliopleistocenici (DI NOCERA & TORRE, 1987).

Infine nella parte nord della zona di studio è presente l'unità di Ariano caratterizzata da una notevole variabilità delle litofacies: conglomerati, arenarie, calca-



reniti, sabbie, argille e argille marnose (DI NOCERA & TORRE, 1987).

La presenza di terreni fortemente deformati e tettonizzati, per gli intensi movimenti tettonici a cui sono stati soggetti e che ne hanno modificato profondamente il loro assetto originario, e l'elevata percentuale di componente argillosa contribuiscono a rendere il territorio suscettibile a franare (Fig. 2). A ciò si aggiunge l'azione erosiva di alcuni corsi d'acqua, molti dei quali a deflusso stagionale, che solcando le valli rendono ancora più soggetta ai dissesti l'area di studio.

Per lo scopo di questo studio, le unità geologiche sono state raggruppate in 9 categorie (Fig. 3); il criterio usato per la suddivisione è quello della similarità litologica che presuppone il comparabile comportamento geotecnico.

La maggior parte dell'area (circa 75%) è ricoperta da terreni ad alto contenuto argilloso. In particolare, le unità del Flysch Rosso (prevalentemente argille e argilliti), corrispondenti al Complesso Indifferenziato (MALATESTA et al., 1967), affiorano su oltre il 50% dell'area di studio. Anche se tali terreni danno origine a rilievi collinari con moderate pendenze, essi comprendono la maggior parte delle frane censite nella zona.

I due gruppi che includono il flysch del Miocene, uno composto da calcari marnosi, arenarie e argille, e l'altro composto principalmente da arenarie con intercalazioni di argille marnose, occupano, rispettivamente circa il 23 e il 10% dell'area di studio. I restanti gruppi litologici (sabbie, argille, argille marnose e conglomerati del Pliocene; depositi alluvionali terrazzati del Pleistocene-Olocene; detriti di falda recenti ed attuali dell'Olocene; alluvioni recenti ed attuali), rappresentano, ognuno, meno del 10% dell'area.

Le categorie dove prevale il contenuto litoide sono meno soggette all'instabilità. Tuttavia, crolli si manifestano talora nelle rocce arenacee o calcaree. Tali rocce in corrispondenza di limitati affioramenti di calcari, brecce e arenarie sovrastanti i terreni argillosi rendono la sommità di alcune alture aspra e scoscesa.

## 2.2 Frane

I movimenti di massa sono comuni nell'intera regione dauna (ad es. ZEZZA et al., 1994), tuttavia sono relativamente pochi gli studi pubblicati sulle frane nei Monti Dauni (ad es. IOVINE et al., 1996; PARISE & WASOWSKI, 2000; WASOWSKI et al., 2007).

Ci sono oltre 20 centri abitati sulle sommità delle colline Daune, molti dei quali hanno risentito in passato di problemi di instabilità dei pendii. Sebbene la documentazione specifica riguardante l'esatta datazione dei singoli eventi franosi sia disponibile solo raramente,



Fig. 2 - "Flysch rosso" con blocchi calcarei nel territorio comunale di Rocchetta Sant'Antonio. Si notano chiari segni di instabilità.

"Flysch rosso" with calcareous blocks in the area of Rocchetta S. Antonio. Note clear signs of slope instability.

dalle informazioni acquisite presso gli Enti locali e dalle dichiarazioni degli abitanti, risulta che negli ultimi anni vi sia stato un aumento dei movimenti di massa in diverse aree urbane e periurbane. È probabile che la stabilità dei pendii ai confini dei centri urbani posti sulle sommità sia gradualmente peggiorata a causa dello sviluppo residenziale e della crescita delle infrastrutture negli ultimi decenni. Questo potrebbe aver portato in alcuni casi alla riattivazione di vecchie frane preesistenti. Inoltre, l'espansione urbana verso pendii con stabilità marginale ha probabilmente prodotto come risultato l'incremento di nuovi dissesti. Negli ultimi anni, inoltre, numerosi e talora estesi movimenti di massa hanno anche determinato perdite delle colture, soprattutto cerealicole, danni alle case rurali e reso impraticabili alcune strade. Per esempio, il 7 marzo 2005 una grande frana, provocata dalle abbondanti piogge, determinò danni al tratto dell'autostrada A16 tra Candela e Lacedonia con conseguente chiusura al traffico e deviazione. Tali eventi hanno ravvivato l'attenzione sulla stabilità dei versanti in questa zona tra le autorità locali e nazionali, nonché tra i ricercatori.

MOSSA et al. (2005) hanno presentato un censimento delle frane, realizzato in ambiente GIS, riguardante l'area confinante a nord-ovest con il territorio comunale di Rocchetta Sant'Antonio. La frequenza areale delle frane superiore al 20% (sia attive che vecchie) ottenuta sull'intera area di 132 km<sup>2</sup> dimostra l'elevata suscettibilità dei pendii. I risultati inoltre hanno mostrato che l'incidenza delle frane è più alta nella classe di pendenze comprese tra 10 e 15° seguita da quelle 5-10° e 15-20°. Questo indica una resistenza molto bassa (residuale) dei materiali del pendio e suggerisce che una porzione significativa dei dissesti può risultare dalla riattivazione di frane preesistenti. In que-

sto senso, frequenti visite su campo condotte negli ultimi anni nell'Appennino dauno confermano che le rimobilizzazioni stagionali (perlopiù in inverno e primavera) di frane preesistenti sono comuni. Nondimeno, anche una franosità superficiale di prima attivazione è diffusa. In molti casi il fattore scatenante sembra collegato alle precipitazioni.

Per quanto riguarda l'influenza della litologia sulla franosità nell'area di studio, essa ovviamente ha un impatto sulla distribuzione spaziale delle frane (in particolare a scala locale) ma non sulla variazione temporale dell'attività franosa nei trent'anni considerati. Infatti, in questo periodo di tempo le analisi delle relazioni tra franosità e litologia hanno mostrato che ci sono comparabili aumenti della franosità attiva in tutte le classi litologiche considerate (LAMANNA, 2008). Quindi il fattore litologia può essere assunto costante coerentemente con gli scopi di questo lavoro.

### 3. FRANE E CAMBIO DI USO DEL SUOLO

#### 3.1 Generalità

Per tracciare un quadro completo dei fenomeni di dissesto nel territorio è stato necessario acquisire dati per mezzo del rilevamento effettuato in campagna e con l'ausilio dell'interpretazione delle foto aeree e delle immagini da satellite. In tal modo sono state prodotte carte inventario dei movimenti di massa e carte tematiche relative ad alcuni fattori correlati all'attività franosa come l'uso del suolo.

Il rilevamento di campagna, effettuato nel 2005, su un'area più ampia di oltre 300 km<sup>2</sup> ha registrato una densità di 3.2 frane/km<sup>2</sup>, la maggior parte delle quali attive, ed una frequenza areale pari al 5.4%. E' emerso che tra i cinque territori comunali esaminati, quello di Rocchetta Sant'Antonio, oltre a presentare la più alta densità di frane, 6.2 per km<sup>2</sup>, e la più alta frequenza

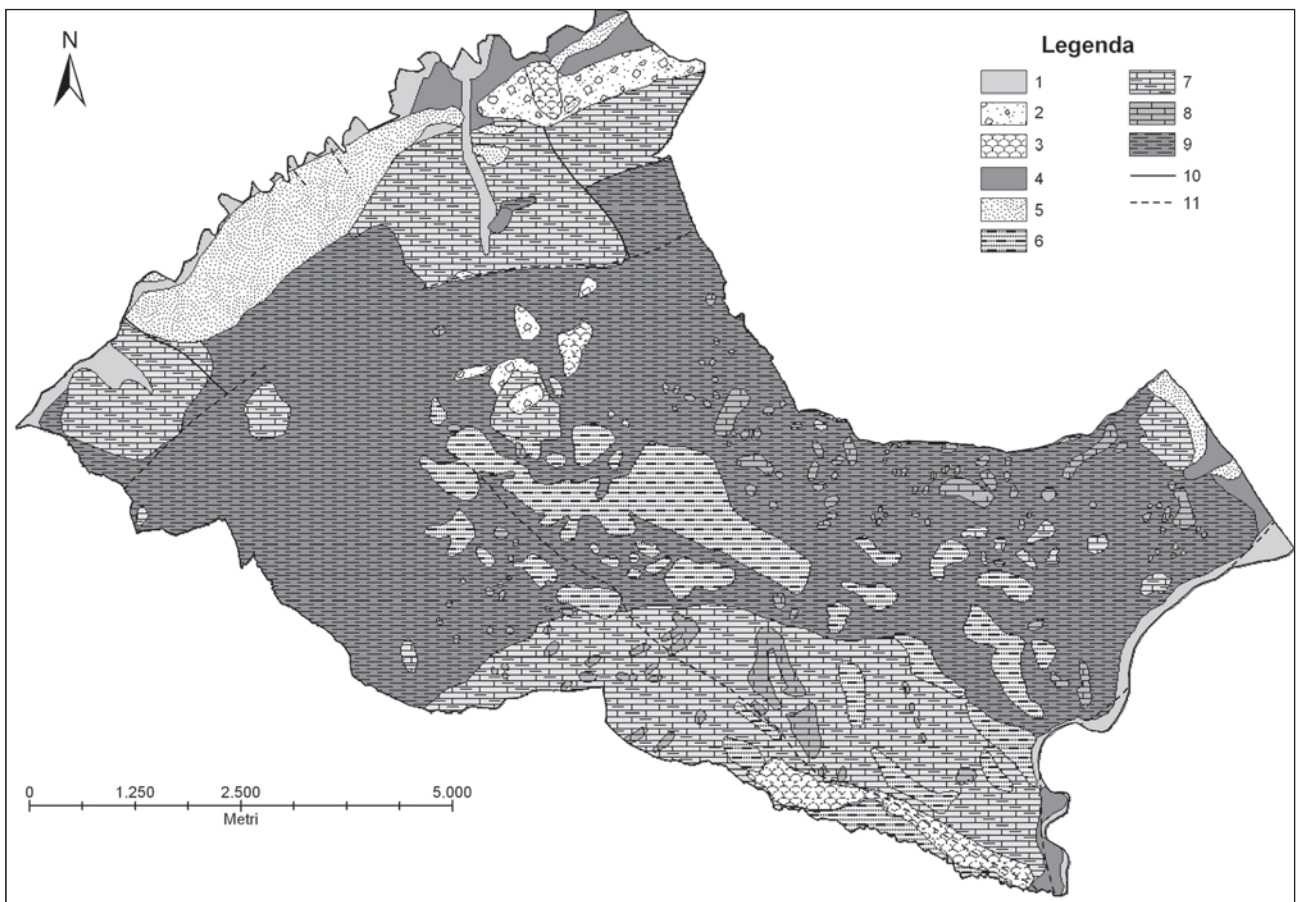


Fig. 3 - Mappa geo-litologica dell'area di studio - territorio comunale di Rocchetta Sant'Antonio; geologia modificata da MALATESTA *et al.* (1967) e JACOBACCI & MARTELLI (1967). Legenda: 1) alluvioni recenti ed attuali; 2) detriti di falda recenti ed attuali (Olocene); 3) depositi di frane; 4) depositi alluvionali terrazzati (sabbie, ghiaie e argille) (Pleistocene-Olocene); 5) sabbie, argille, argille marnose e conglomerati (Pliocene); 6) arenarie includenti intercalazioni di argille scistose marnose (Miocene); 7) calcari marnosi, arenarie e argille scistose (Miocene); 8) Complesso Indifferenziato (breccie calcaree, calcareniti) (Paleogene); 9) Complesso Indifferenziato (principalmente argille scistose e argille scistose marnose, e secondariamente calcari, calcareniti, breccie, arenarie) (Cretaceo superiore-Paleogene); 10) faglie; 11) faglie supposte.

Geo-lithological map of the study area - municipal territory of Rocchetta S. Antonio; geology modified after Malatesta *et al.* (1967) and Jacobacci & Martelli (1967). Legend: 1) recent alluvium; 2) slope debris (Holocene); 3) landslide deposit; 4) alluvial terrace deposit (sand, gravel and clay) (Pleistocene-Holocene); 5) sand, clay, marly clay and conglomerate (Pliocene); 6) sandstone including marly clay-shale intercalations (Miocene); 7) marly limestone, sandstone and clay-shale (Miocene); 8) Undifferentiated Complex (limestone breccia, calcarenite) (Paleogene); 9) Undifferentiated Complex (primarily clay-shale and marly clay-shale, and secondarily limestone, calcarenite, breccia, sandstone) (Late Cretaceous- Paleogene); 10) fault; 11) fault-inferred.



areale (11.1%), comprende anche notevoli danni alle infrastrutture, in particolare alle vie di comunicazione (Fig. 4). Si è quindi ritenuto di focalizzare lo studio sul territorio comunale di Rocchetta (72 km<sup>2</sup>) (Fig. 1). In quest'area, solo le sommità più ripide ed elevate includono una percentuale significativa di suolo arboreo. Altrove, specie dove predominano unità prevalentemente argillose, la copertura vegetale è rappresentata soprattutto da coltivazioni cerealicole e localmente da pascolo nelle zone con vegetazione erbacea intercalate da radi cespugli. Le aree incolte sono molto limitate e corrispondono ad affioramenti di litotipi più rocciosi. La densità relativa di insediamenti urbani e rurali, strade ed altre infrastrutture è molto bassa.

Il territorio di Rocchetta è caratterizzato da clima mediterraneo (subappenninico) con piovosità annua tipicamente compresa tra 600 e 750 mm. Gli inverni sono umidi e miti, con precipitazioni nevose molto limitate. Le estati sono tipicamente calde e asciutte.

### 3.2 Materiali e metodi

Qualsiasi approccio metodologico, finalizzato alla realizzazione di uno studio sulla variazione della franosità nel tempo e sulle sue cause, prevede un accurato catalogo e un'analisi dei movimenti di massa in atto nell'area. Il metodo più comune per l'acquisizione dei dati terrestri e la realizzazione di carte inventario dei fenomeni franosi è quello di mettere insieme mappe derivanti da documenti di varia origine, da rilevamenti sul campo e dall'interpretazione ed elaborazione di dati telerilevati (foto aeree ed immagini da satellite). MANTOVANI *et al.* (1996) considerarono che mentre le tecniche di fotointerpretazione erano ben note, l'utilizzo delle immagini satellitari era meno diffuso. In particolare, gli autori constatarono che solo un numero limitato di ricercatori sfruttava completamente immagini multispettrali. Oggi le immagini da satellite possono costituire una valida alternativa alle foto aeree, e trovare un impiego sempre maggiore per lo studio dei movimenti franosi, grazie alla disponibilità crescente di dati con una risoluzione molto alta (NICHOL *et al.*, 2006).



Fig. 4 - In alto: muro di sostegno travolto da una frana; si osservano frane superficiali in terreni essenzialmente argillosi del "Flysch Rosso" (Valle Capo Diavolo, Rocchetta Sant'Antonio). In basso: sede stradale (SP99bis Rocchetta-Rocchetta Scalo) danneggiata da un movimento franoso.

*Upper: Photo showing retaining wall sheared by a deep slope movement (foreground) and shallow landslides in clay-rich "Flysch Rosso" materials in Valle Capo Diavolo, Rocchetta S. Antonio (background). Lower: SP99bis Rocchetta-Rocchetta Scalo road damaged by a landslide.*

#### 3.2.1 Dati utilizzati

Le informazioni ed i data set principali sfruttati nel presente lavoro sono qui elencati:

- base topografica alle scale 1:5000, 1:2000 e 1:500, del 2002;
- Modello Digitale del Terreno (DTM) generato dalle mappe in scala 1:5000 citate;
- fotografie aeree cartacee in b/n, in scala 1:25000, di

- luglio 1976;
- immagine multispettrale del satellite ASTER (usando le bande nel visibile e quella nel vicino infrarosso a 15 m di risoluzione), di luglio 2000;
- immagine multispettrale del satellite IKONOS con risoluzione di 1 m in modalità pancromatica, di aprile 2006;
- dati termometrici mensili e pluviometrici giornalieri.

L'interpretazione delle immagini telerilevate si è avvalsa inoltre delle conoscenze locali della geologia e franosità nella zona di studio acquisite durante i numerosi rilievi su campo svolti in situ negli anni 2005-2007.

L'analisi, riguardante l'intero territorio comunale di Rocchetta Sant'Antonio, è stata eseguita usando le tecniche GIS (*Geographic Information System*), in quanto queste ultime oltre a facilitare la preparazione delle carte stesse con maggiore efficienza ed accuratezza rispetto al passato, hanno facilitato l'esame delle relazioni spaziali e temporali tra frane e uso del suolo permettendo di integrare dati di diversa origine, scala, formato e sistema di riferimento cartografico.

### 3.2.2 Metodologia di realizzazione delle carte della franosità

Per ottenere un catalogo storico delle frane si è effettuata una interpretazione stereoscopica delle foto aeree del 1976.

Per realizzare le carte delle frane, le fotografie aeree del 1976 sono state sottoposte a scansione, ortorettificate e infine mosaicate in modo da ottenere un'unica immagine dell'area. Dopo aver identificato sui fotogrammi i movimenti franosi questi sono stati importati in ambiente GIS.

Nei rilevamenti di campagna si sono osservate frane di varie dimensioni, anche della lunghezza delle decine di metri o inferiore. Per poter effettuare la mappatura di movimenti franosi anche di piccole dimensioni, e ottenere un catalogo recente completo delle frane si sono adoperate immagini IKONOS ad alta risoluzione, acquisite all'inizio della primavera del 2006. Utilizzando una singola immagine IKONOS e non la molto costosa coppia stereo, si sono riconosciute essenzialmente le frane attive *s.l.* e la successiva analisi comparativa con i dati del 1976 si è basata solo su questa categoria di movimenti franosi. Invece la mancanza dell'osservazione stereoscopica non ha permesso l'individuazione di diverse frane inattive *s.l.* riconosciute in sito.

Anche se non ci sono ancora molti esempi in letteratura di applicazioni dell'immagine IKONOS per l'individuazione delle frane, alcuni autori (NICHOL *et al.* 2006; VAN WESTEN *et al.* 2008) hanno dimostrato chiara-

mente l'utilità di questo tipo di dati ottici.

La mappatura delle frane è stata facilitata dalla visualizzazione tridimensionale dell'immagine sovrapposta al DTM dettagliato. Inizialmente, sono state ortorettificate le singole bande (bande 1 - 4 e pancromatica). Successivamente, le immagini sono state elaborate per mezzo della procedura pan-sharpening che ha permesso di osservare le immagini IKONOS in colori naturali compositi con 1 metro di risoluzione. L'immagine IKONOS, pan-sharpened ed ortorettificata, visualizzata in tre dimensioni in colori naturali, rende chiaramente osservabile la posizione delle frane sui versanti, in particolare di quelle attive (Fig. 5). Tutte le frane osservate sono state riprodotte sulle carte digitalizzandole sull'immagine IKONOS ortorettificata.

### 3.2.3 Metodologia di realizzazione delle carte dell'uso del suolo

Per mappare l'uso del suolo nel 1976 si sono utilizzate le stesse foto aeree adoperate per realizzare la carta delle frane dello stesso anno. Poiché i tentativi di utilizzare procedure automatiche di classificazione hanno fornito risultati inaffidabili, le classi di uso del suolo sono state estratte tramite fotointerpretazione. Si sono distinte tre classi principali: "terreno agricolo" (seminativo con coltivazioni, soprattutto cerealicole, comportanti aratura) che rappresenta di gran lunga il gruppo prevalente (Fig. 1); "terreno alberato", includente le formazioni vegetali che presentano copertura sufficientemente densa ed estesa da attenuare l'impeto dell'acqua che scorre in superficie (boschi, macchia, frutteti, alberature adiacenti alle strade e ai corsi d'acqua);

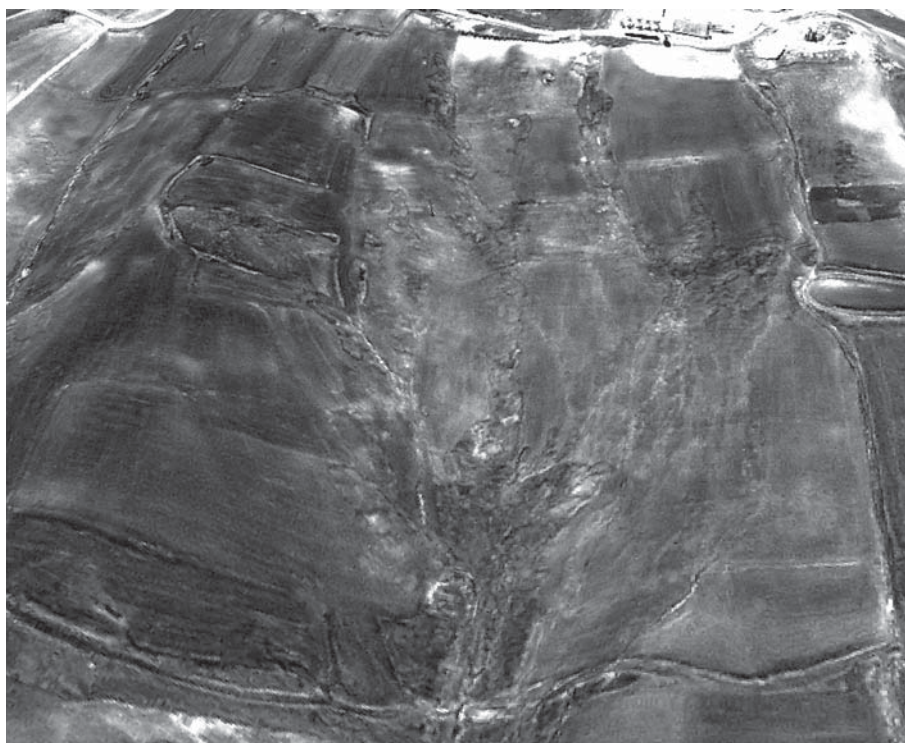


Fig. 5 - Particolare dell'immagine IKONOS ortorettificata pan-sharpened sovrapposta al DTM (le altezze sono state esagerate di 3 volte): si osservano in dettaglio le frane attive.

*Zoom of pan-sharpened and orthorectified IKONOS image overlapped on DTM (3x vertical exaggeration): active landslides are clearly visible.*



“altro” (comprendente incolto, suolo nudo, pascolo e infrastrutture). La scelta dei tre gruppi è stata dettata dai principali tipi di copertura del suolo e di uso del suolo presenti nell’area di studio, come anche dal loro potenziale impatto sulle frane superficiali.

Inizialmente, la realizzazione della mappa dell’uso del suolo recente è stata tentata utilizzando l’immagine IKONOS. Tuttavia, poichè si è utilizzata la classificazione automatica (con procedura supervisionata), l’immagine IKONOS non ha fornito risultati affidabili (l’acquisizione è avvenuta quando le colture cerealicole e foraggiere erano ancora verdi, con piante di bassa altezza e quindi facilmente confondibili con le aree incolte ed i pascoli). Pertanto si è preferito usare l’immagine ASTER dell’estate 2000, che ha consentito una classificazione automatica dell’uso del suolo (i campi a cereali presentavano una risposta spettrale nettamente diversa dalle zone incolte).

Un esame qualitativo delle immagini ha suggerito che tra il 2000 ed il 2006 vi sono stati cambi di uso del suolo di modesta entità. Infatti non risulta che l’area negli ultimi anni sia stata interessata da eventi catastrofici (es. incendi) o da cambiamenti importanti nelle politiche di uso del suolo. Pertanto la carta dell’uso del suolo derivata da ASTER è stata assunta valida anche per il 2006.

La classificazione con procedura supervisionata dell’immagine ASTER è stata eseguita usando tre bande (due nel visibile e una nel vicino infrarosso, VNIR).

### 3.3 Distribuzione delle frane

Al fine di studiare la differenza tra la distribuzione delle frane del 1976 e quelle del 2006 si sono realizzate due serie di mappe dell’attività franosa (cf. SOETERS & VAN WESTEN, 1996), derivate da foto aeree ed interpretazione di immagini satellitari. Si è seguito il criterio geomorfico tipicamente adottato nella ricognizione delle frane e del loro stato di attività da immagini aeree (ad es. WIECZOREK, 1984). Tenendo conto dello scopo di questo studio si è distinto esclusivamente tra frane attive s./ ed inattive s./ La terminologia adottata è ispirata alle indicazioni del WP/WLI (1993), leggermente modificate.

In particolare, per il fenomeno attivo s./ intendiamo una frana che si è mossa l’ultima volta entro l’ultimo ciclo stagionale o al massimo nel corso del penultimo. Non pretendiamo di distinguere dalle immagini telerilevate le frane attive s.s. (cioè quelle che erano in movimento al momento dell’acquisizione delle foto aeree o immagini satellitari) e i fenomeni sospesi, i.e. quelli che si sono mossi durante gli ultimi due cicli stagionali. Per

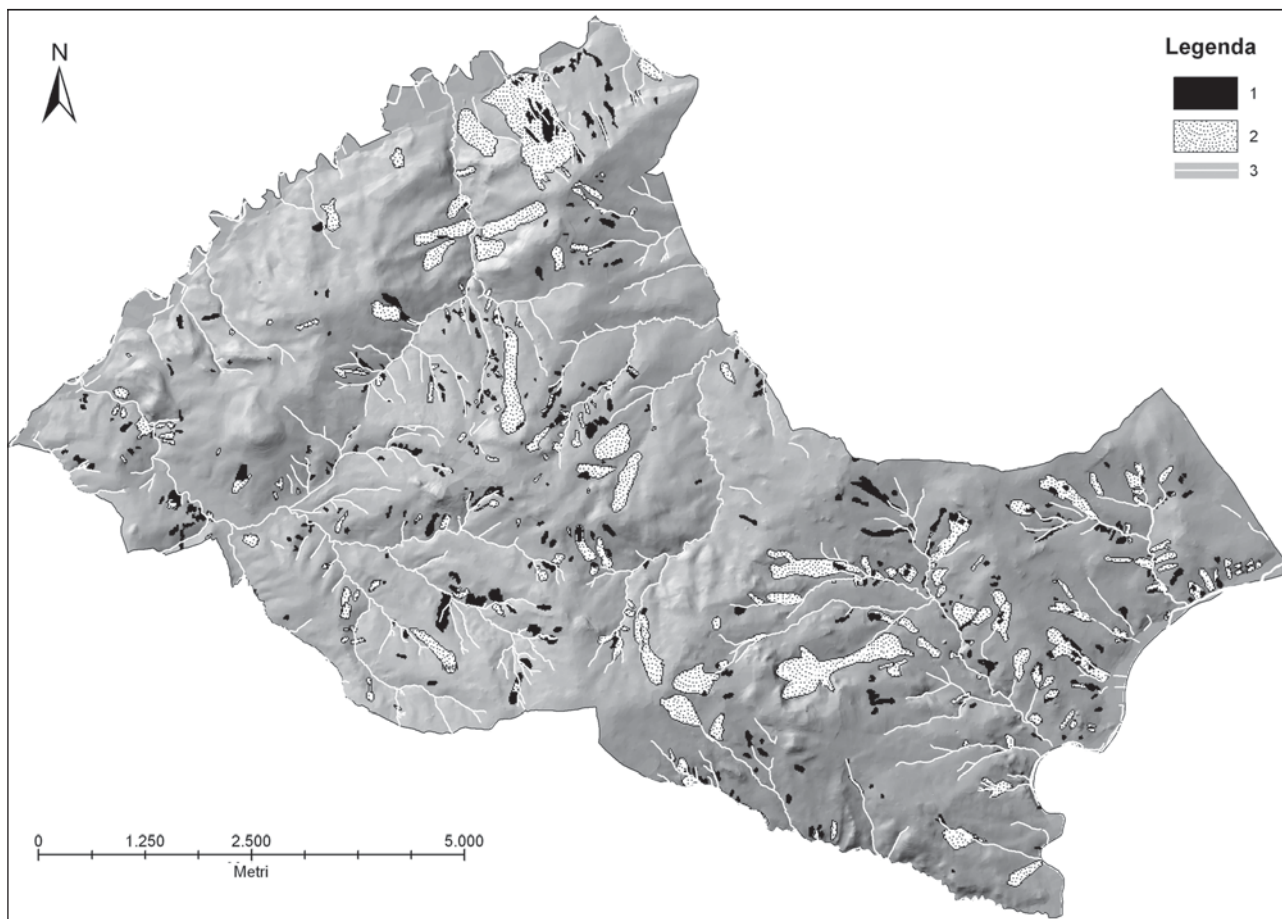


Fig. 6 - Carta delle frane del 1976 e reticolo idrografico sovrapposti al DTM nel territorio di Rocchetta. Legenda: 1) frane attive nel 1976; 2) frane inattive nel 1976; 3) reticolo idrografico.

Map of 1976 landslides and hydrographic network draped over DTM (Rocchetta S. Antonio territory). Legend: 1) active landslides in 1976; 2) inactive landslides in 1976; 3) drainage network.



frane inattive *s.l.*, in questo lavoro, si intendono quelle che si sono mosse l'ultima volta prima degli ultimi due cicli stagionali; la conoscenza pluriennale della zona di studio suggerisce che una buona parte di queste frane potrebbe essere classificata come fenomeni quiescenti.

Una caratteristica degli inventari delle frane inattive è che l'evidenza sul terreno dell'esistenza di molte frane più piccole viene persa a causa di modifiche successive come processi erosivi, crescita della vegetazione, influenza antropica inclusi i lavori di aratura. Pertanto, con il passare del tempo, i limiti delle frane in genere si distinguono sempre più difficilmente anche dalle fotografie aeree e l'inventario delle frane inattive è più soggetto ad errori ed è meno completo. Pertanto, le stime riguardanti la variazione dell'attività franosa nel periodo di 30 anni considerato in questo studio si basano esclusivamente sui dati relativi ai fenomeni attivi.

E' noto che molti fattori influenzano l'affidabilità, la completezza e la risoluzione di una carta inventario, tra cui: la freschezza delle frane e l'età, la qualità e la scala delle immagini telerilevate, la complessità morfologica e geologica dell'area di studio, i tipi di uso del suolo e le sue alterazioni e il grado di esperienza del geomorfologo coinvolto. In particolare, il riconoscimento delle caratteristiche delle frane dalle fotografie aeree in visione stereoscopica è una tecnica soggettiva,

empirica e che richiede molta esperienza, pratica, metodologia e criteri di interpretazione ben definiti (MALAMUD et al., 2004). Chiaramente, i criteri basati sull'espressione superficiale di forme geomorfiche sono soggettivi; nondimeno, questo lavoro riguarda le variazioni dell'attività franosa considerate come variazioni nel tempo della frequenza areale dei movimenti di massa attivi, che pertanto non devono necessariamente indicare un valore assoluto di franosità.

### 3.3.1 Confronto tra la franosità del 1976 e del 2006

I cataloghi delle frane del 1976 (Fig. 6) e del 2006 (Fig. 7) sono relativi all'intero territorio comunale di Rocchetta Sant'Antonio.

In Figura 8 sono sintetizzate le differenze di attività franosa. I risultati sono presentati in termini di numero di frane per km<sup>2</sup> e frequenza areale delle frane (percentuale dell'area occupata dalle frane sul totale dell'area) per facilitarne il confronto con altre aree franose.

Nel valutare le distribuzioni delle frane osservate nelle due date, si sono tenuti presenti i possibili effetti derivanti dalla differente risoluzione e modalità di elaborazione delle foto aeree e dell'immagine satellitare.

L'immagine IKONOS esaminata, per esempio, permette un'ottima risoluzione delle superfici di distac-

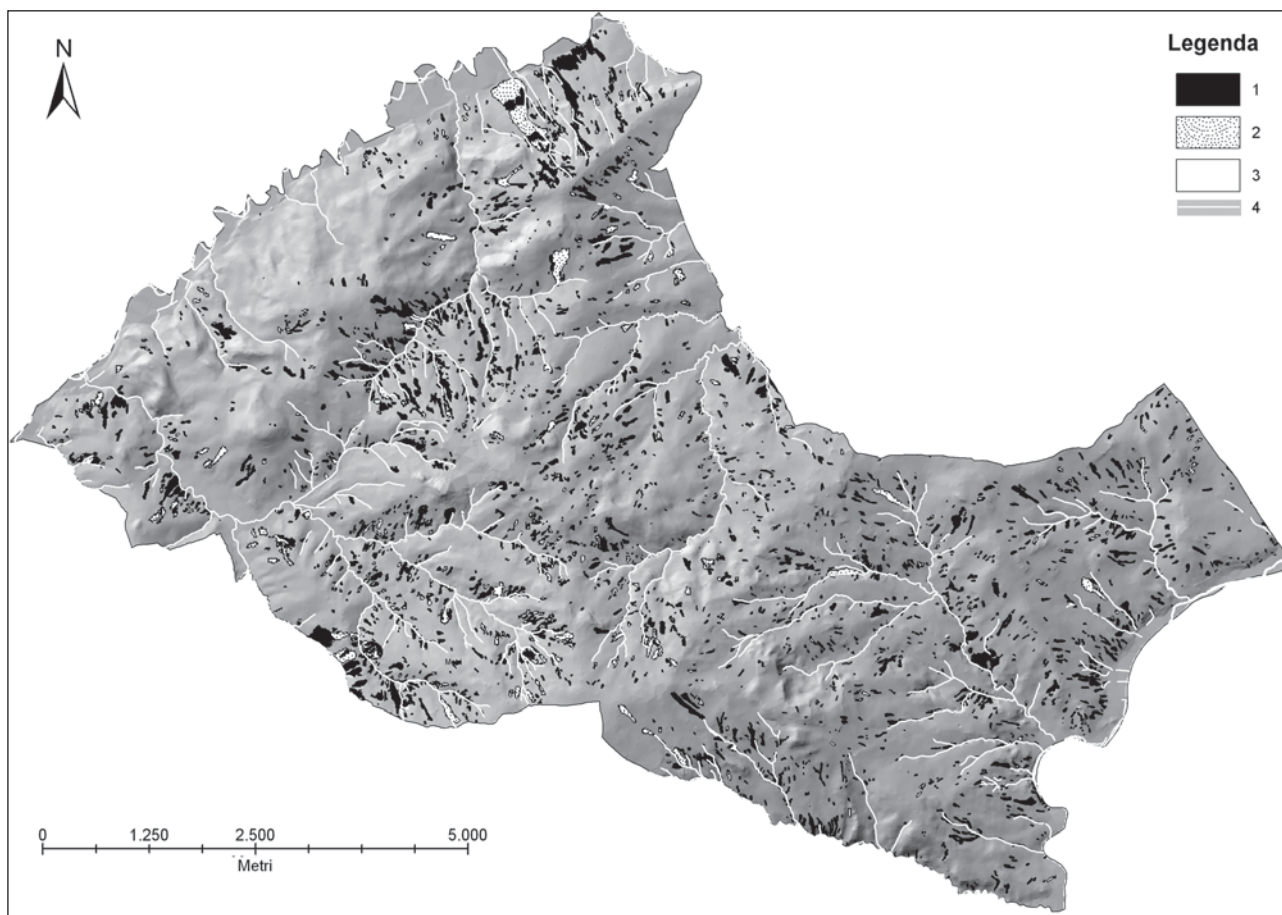


Fig. 7 - Carta delle frane del 2006 e reticolo idrografico sovrapposti al DTM nel territorio di Rocchetta. Legenda: 1) frane attive nel 2006; 2) frane inattive nel 2006; 3) frane incerte nel 2006; 4) reticolo idrografico.

Map of 2006 landslides and hydrographic network draped over DTM (Rocchetta S. Antonio territory). Legend: 1) active landslides in 2006; 2) inactive landslides in 2006; 3) uncertain landslides in 2006; 4) drainage network.

co e dà la possibilità di identificare in dettaglio numerose frane coalescenti laddove sulle fotografie si identifica un'unica frana. Invece, alcune grandi frane inattive, identificate sulle foto aeree del 1976, non sono state riconosciute sulle immagini IKONOS del 2006, non stereoscopiche. Infatti, il catalogo del 2006 include una classe di frane incerte, alcune delle quali si sovrappongono alle aree con frane inattive nel catalogo relativo al 1976 (Fig. 6 e Fig. 7). Nondimeno, le differenze nelle distribuzioni delle frane attive classificate con certezza sono pronunciate, e se ne può dedurre una variazione evidente nell'estensione areale. In particolare, il confronto tra i dati del 1976 e del 2006 mostra un incremento del 160% nella frequenza areale delle frane attive (Fig. 8). Una tendenza opposta si nota per le frane inattive, passando dal 7.1 all'1.6%, ed alcune delle frane inattive del 1976 risultano attive nel 2006 (Fig. 6 e Fig. 7).

Per stimare gli effetti delle due differenti metodologie di osservazione sulla stima del numero e delle aree interessate dalle frane attive, queste sono state suddivise per classi di dimensione. Si nota come la distribuzione nelle classi a partire da 2000 m<sup>2</sup> sia simile negli inventari relativi alle due date (Fig. 9). Al contrario si osserva come nel catalogo del 1976 sia molto ridotta la quantità di frane con estensione inferiore a 2000 m<sup>2</sup>. In particolare nel 1976 l'area interessata da frane superiori a 2000 m<sup>2</sup> costituisce l'85% dell'area in frana complessiva, mentre scende al 65% nel catalogo del 2006 (Fig. 9). Ciò è coerente con la minore risoluzione e con la diversa tecnica di osservazione delle foto aeree, che rende non riconoscibili le frane di estensione minima, e individua come frana unica un insieme di piccole frane coalescenti. Trascurando quest'ultimo aspetto, e assumendo quindi che la citata differenza tra le distribuzioni sia dovuta esclusivamente alla mancata osservazione di frane di piccole dimensioni nelle foto aeree del 1976, se ne ricava una sottostima del 25% dell'area in frana complessiva a quella data.

Tale assunzione è tuttavia assolutamente cautelativa, in quanto considera come "non osservata" l'area interessata da movimenti coalescenti di piccole estensioni che invece possono essere individuati come singolo movimento di estensione maggiore. Una stima più ragionevole parte dalla constatazione della grande difficoltà, sulle foto aeree del 1976, del censimento di frane attive singole con dimensioni inferiori a 1000 m<sup>2</sup>. Frane di queste dimensioni occupano complessivamente circa il 18% dell'intera area in frana nel catalogo del 2006 e solo il 3.4 % nel catalogo del 1976

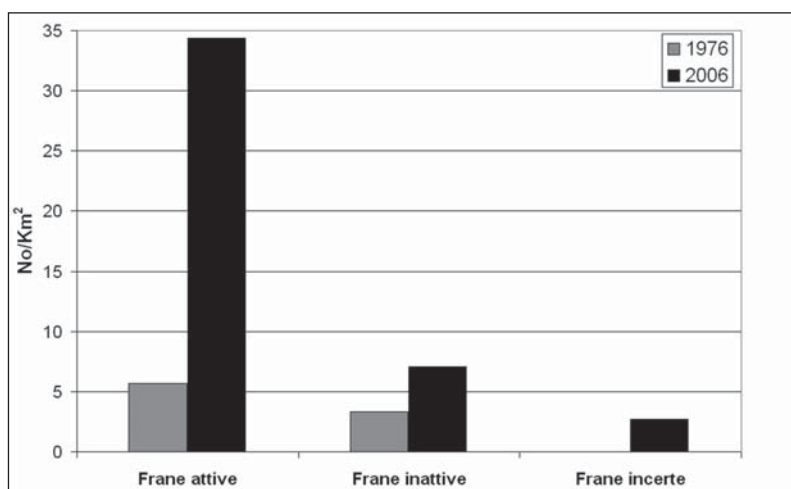
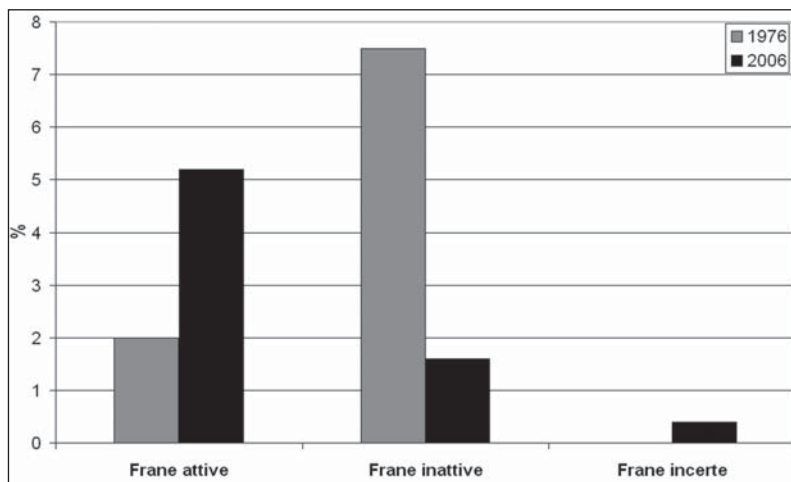


Fig. 8 - Statistica della franosità per il 1976 e il 2006; in alto: frequenza areale in %; in basso: numero per km<sup>2</sup>. La percentuale è riferita all'intera area di studio (72 km<sup>2</sup>); le frane incerte sono principalmente dovute alla mancanza di stereoscopia nell'immagine del 2006.

*Landslide statistics for 1976 and 2006; upper: area frequency in %; lower: number per km<sup>2</sup>. The percentage is referred to the entire study area (72 km<sup>2</sup>); uncertain landslides are mainly due to the lack of stereoscopy in 2006 imagery.*

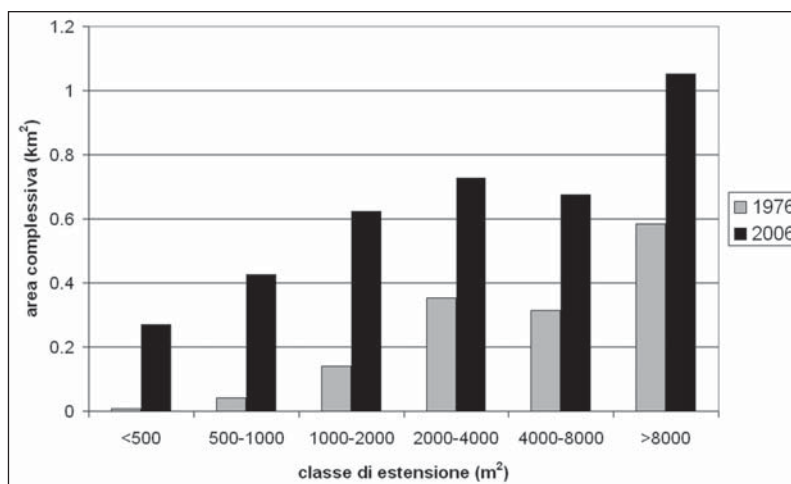


Fig. 9 - Aree (km<sup>2</sup>) interessate dalle frane attive nel 1976 e nel 2006 suddivise per classi di estensione (m<sup>2</sup>) delle stesse.

*Areas (km<sup>2</sup>) affected by active landsliding in 1976 and 2006 according to different size classes (m<sup>2</sup>) of landslides.*



(Fig. 9): ne consegue una discrepanza, dovuta alla differente metodologia di osservazione, inferiore al 15%. Questo valore, non altera significativamente l'evidenza dell'aumento dell'attività franosa. Infatti, assumendo per il 1976 una sottostima dell'area in frana pari al 15%, l'incremento della franosità tra il 1976 e il 2006 risulta comunque superiore al 120%.

### 3.3.2 Distribuzione delle frane e reticolo idrografico

Mossa *et al.* (2005) studiando la franosità dell'area a nord-ovest del territorio di Rocchetta Sant'Antonio hanno osservato che la distribuzione delle frane è strettamente connessa ai sistemi locali di drenaggio. L'interpretazione delle foto aeree del 1976 e delle immagini da satellite IKONOS del 2006 forniscono le stesse indicazioni per la zona in esame in questo lavoro. Infatti, considerando il modello del locale drenaggio dell'intera area di studio, estratto dalla CTR al 5000, sovrapposto alle carte inventario delle frane del 1976 e del 2006 (Fig. 6, Fig. 7), si osserva che le frane e il reticolo drenante sono intimamente legati sia perché spesso le frane raggiungono i corsi d'acqua (e sono erose al piede), sia perché si attivano entro le vallecole fluviali.

Per fornire informazioni più oggettive sulle relazioni tra la distribuzione delle frane e i corsi d'acqua sono state condotte alcune analisi quantitative. Si sono considerate quattro zone di rispetto di ampiezza crescente intorno ai corsi d'acqua: la prima tra 0 e 20 m, la seconda tra 20 e 40 m, la terza tra 40 e 80 m e l'ultima tra 80 e 160 m. Quindi si sono effettuate le intersezioni delle superfici così delimitate con le frane attive e i dati sono stati espressi in termini di frequenze areali (Fig. 10).

Si osserva che la frequenza areale delle frane attive del 1976 e del 2006 decresce con la distanza dal corso d'acqua e intorno al reticolo idrografico vi è una più alta concentrazione di movimenti franosi rispetto al valore medio sull'intero territorio comunale di Rocchetta. Inoltre si osserva un aumento pressochè uniforme della frequenza areale delle frane attive dal 1976 al 2006, su tutta l'area considerata, quindi l'influenza del corso d'acqua sulle variazioni della franosità non è cambiata in maniera significativa nei trent'anni considerati.

### 3.4 Franosità attiva e variazioni nell'uso del suolo

Dopo avere ricavato le mappe dell'uso del suolo relative al 1976 (Fig. 11a) ed al 2006 (Fig. 11b) per indicare le variazioni dell'uso del suolo nel periodo considerato, i dati mappati sono stati espressi come percentuale dell'area totale.

I risultati mostrano che circa il 52% dell'area era usata come seminativo negli anni '70 e che fino all'anno 2000 tale percentuale era cresciuta fino al 75%. Un cambiamento così pronunciato dell'uso del suolo in un'area montuoso-collinare può aver avuto un impatto sulla stabilità dei pendii. I terreni alberati e l'altro, invece, sono diminuiti in estensione: per l'"altro",

vi è stato un aumento delle aree antropizzate e una diminuzione delle aree incolte. L'influenza dei cambiamenti di uso del suolo sui movimenti franosi può essere evidenziata considerando la distribuzione delle frane attive sui campi coltivati (Fig. 11a e Fig. 11b).

Un confronto visuale delle mappe del 1976 e del 2006 indica che i terreni divenuti agricoli dopo il 1976 ("nuovo seminativo") sono caratterizzati da una maggiore densità di frane attive. Per evidenziare le correlazioni tra i cambiamenti dell'estensione areale del seminativo e le variazioni delle frane attive, si sono considerati separatamente i terreni a seminativo già nel 1976 (vecchio seminativo) e quelli divenuti tali solo dopo quella data (nuovo seminativo) (Fig. 12).

Sul vecchio e sul nuovo seminativo le frane attive si sono quasi triplicate (rispettivamente +181% e +161%); tuttavia il nuovo seminativo era più franoso già prima di essere coltivato. Nel 1976 infatti, la frequenza areale delle frane in queste aree era del 2.9%, superiore anche a quella che si riscontrava sui terreni già adibiti a seminativo (1.8%). Si nota anche che nello stesso periodo la frequenza di frane attive nelle restanti aree (non seminate nel 1976 e neppure oggi) è aumentata molto meno (+98%). Questo suggerisce che le coltivazioni e le relative arature rendono i pendii più suscettibili alla instabilità.

Per comprendere meglio la più alta franosità delle aree del nuovo seminativo, l'estensione areale dei seminativi del 1976 e del 2006 è stata suddivisa per classi di pendenza (Tab. 1).

Tab. 1 - Distribuzione dei campi coltivati nel 1976 e nel 2006 in funzione della pendenza dei versanti.

*Distribution of sown fields in 1976 and 2006 versus slope angle.*

Pendenza (gradi)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	> 25
Area dei seminativi 1976 (km <sup>2</sup> )	4.51	22.44	9.66	0.54	0.04	0.02
Area dei seminativi 2006 (km <sup>2</sup> )	6.60	29.34	15.56	2.05	0.42	0.21

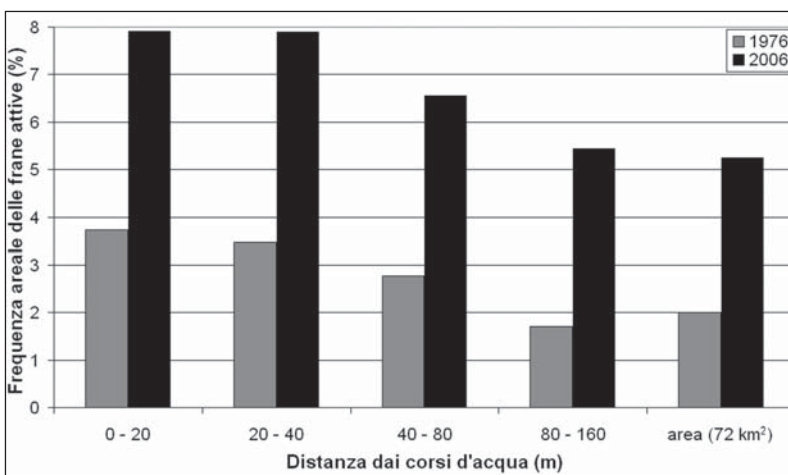


Fig. 10 - Frequenza areale delle frane attive del 1976 e del 2006 intorno ai corsi d'acqua e nell'intero territorio comunale di Rocchetta Sant'Antonio.

*Area frequency of active landsliding of 1976 and 2006 in different buffers near drainage network and in the entire municipal territory of Rocchetta S. Antonio.*

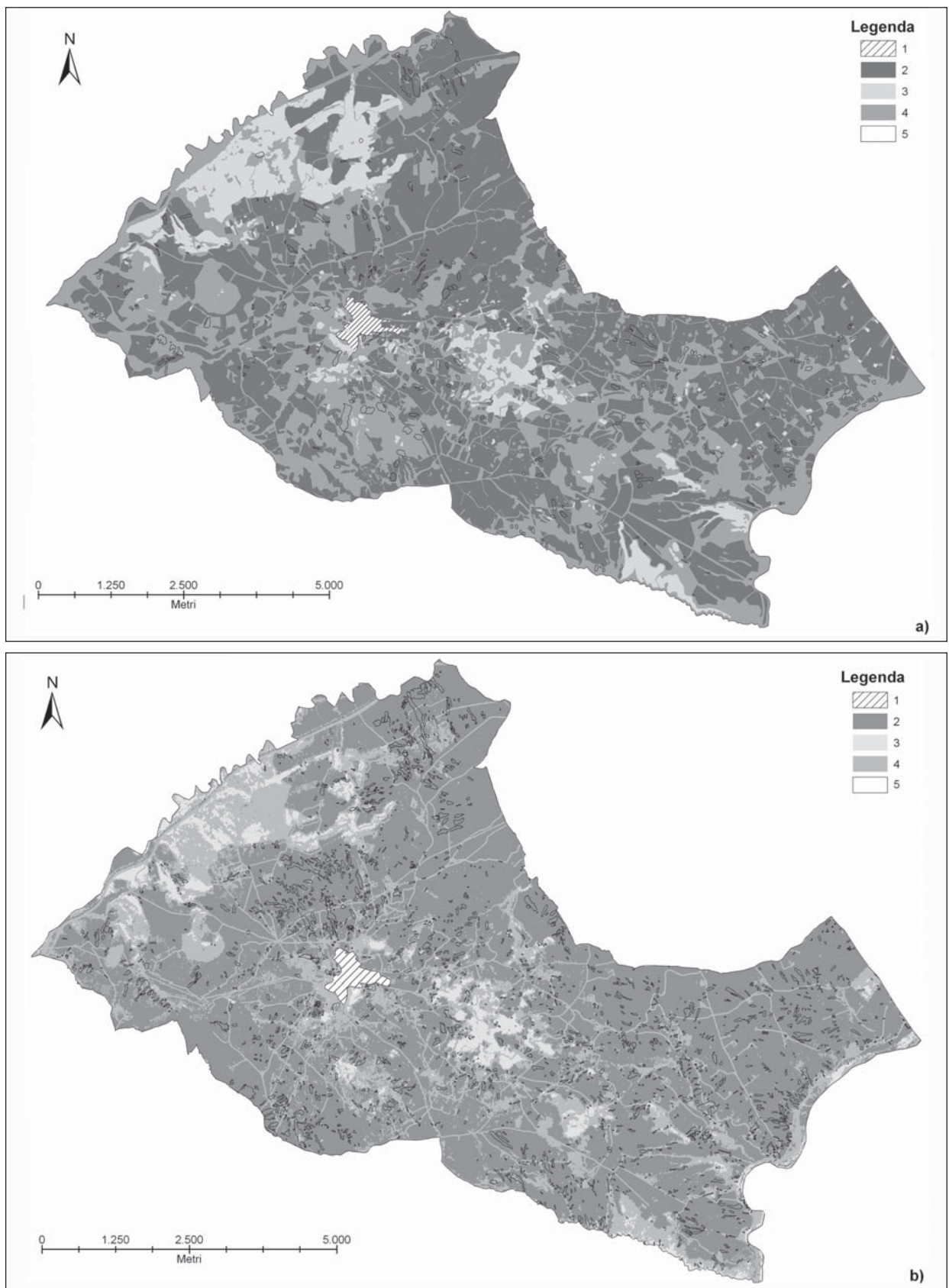


Fig. 11 - Carte di uso del suolo e distribuzione delle frane attive nel territorio di Rocchetta Sant'Antonio: a) carta del 1976 ottenuta dall'osservazione stereoscopica delle foto aeree; b) carta del 2006 ottenuta con l'utilizzo delle immagini IKONOS e ASTER. Legenda: 1) Rocchetta Sant'Antonio; 2) terreno agricolo; 3) terreno alberato; 4) altro; 5) frane attive.

*Land use and distribution of active landslides in the Rocchetta S. Antonio territory: a) 1976 map obtained through a stereoscopic interpretation of aerial photos; b) 2006 map derived from IKONOS and ASTER imagery. Legend: 1) Rocchetta S. Antonio; 2) sown field; 3) trees; 4) other; 5) active landslides*



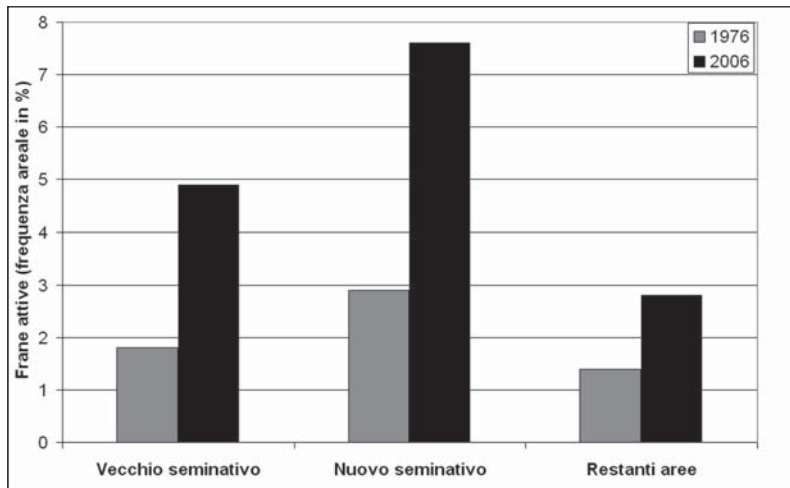


Fig. 12 - Variazioni temporali nella frequenza areale delle frane attive (in %) per i campi coltivati e per le restanti aree. Il vecchio seminativo rappresenta le aree già coltivate nel 1976, il nuovo seminativo le aree coltivate dopo il 1976, le restanti aree includono i terreni alberati e l'altro.

*Temporal variation in area frequency of active landsliding (in %) for sown fields and remaining areas. The old sown represents areas already sown in 1976, the new sown corresponds to areas sown after 1976, and the remaining areas include arboreous land and other.*

Tab. 2 - Distribuzione delle pendenze dei terreni già coltivati nel 1976 (vecchio seminativo) e di quelle dei terreni coltivati dopo il 1976 (nuovo seminativo).

*Area frequency statistics of slope angles for fields already sown in 1976 (old sown) and those sown after 1976 (new sown).*

Pendenza (gradi)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	> 25
Distribuzione delle pendenze del vecchio seminativo (%)	12.10	60.30	25.97	1.46	0.12	0.05
Distribuzione delle pendenze del nuovo seminativo (%)	12.83	42.10	34.30	7.91	1.92	0.94

Tab. 3 - Frequenze areali delle frane attive nel 1976 e nel 2006 in ciascuna classe di pendenza.

*Area frequency of active landsliding in 1976 and in 2006 for slope classes.*

Pendenza (gradi)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	>40
Frequenza areale frane attive 1976 (%)	0.45	1.65	3.03	3.46	1.76	0.74	0.49	0.36	2.31
Frequenza areale frane attive 2006 (%)	1.33	4.13	8.46	7.36	3.90	3.50	3.11	4.60	7.78

Tab. 4 - Frequenza areale delle frane attive nel 1976 e nel 2006 sui campi divenuti agricoli dopo il 1976 (nuovo seminativo) nelle diverse classi di pendenza.

*Area frequency of active landsliding in 1976 and in 2006 for slope classes of fields sown after 1976 (new sown).*

Pendenza (gradi)	0-5	5-10	10-15	15-20
Frequenza areale frane attive 1976 su nuovo seminativo (%)	0.72	2.06	4.03	5.85
Frequenza areale frane attive 2006 su nuovo seminativo (%)	1.81	5.09	11.29	13.37

Dalla Tabella 1 si evince che la maggior parte dei campi coltivati nel 1976 e nel 2006 ricade nell'intervallo 5-10°. Inoltre si osserva che i seminativi su pendenze comprese tra 5 e 10° sono aumentati del 31%, nella classe di pendenza tra 10 e 15° del 61% e oltre i 15° del 342%. Appare quindi chiaro che le coltivazioni su pendenze elevate, dapprima marginali, hanno finito per riguardare porzioni significative del territorio.

Per approfondire ulteriormente le ragioni alla base della più alta franosità delle aree seminate dopo il 1976, si è confrontata la loro distribuzione di pendenze con quella delle aree già coltivate nel 1976 (Tab. 2).

I risultati mostrano che i terreni di recente coltivazione sono caratterizzati da pendenze significativamente più elevate, mentre i campi già coltivati nel 1976 mostravano pendenze più dolci. Questo suggerisce che l'incremento delle frane attive sia risultato, almeno in parte, dall'estensione delle coltivazioni su terreni più ripidi e presumibilmente meno stabili.

Considerando la frequenza areale delle frane attive nel 1976 e nel 2006 in ciascuna classe di pendenza (Tab. 3), si osserva che dal 1976 al 2006 c'è stato un aumento percentuale delle aree in frana in tutte le classi di pendenza.

Infine, considerando le frequenze areali delle frane attive del 1976 e del 2006 sul nuovo seminativo (Tab. 4), nelle diverse classi di pendenza, si osserva un incremento generale della franosità dal 1976 al 2006. L'aumento è più alto nella classe 10-15° (oltre il 180%); inoltre la più alta frequenza di frane attive (oltre il 10%) si è osservata nelle classi 10-15° e 15-20°, che

includono circa la metà di tutte le aree coltivate a cereali verso il 1976; questi versanti già nel 1976, ovvero prima di essere coltivati, erano più instabili. Questo conferma il legame tra l'estensione delle coltivazioni sui versanti più ripidi e l'aumento delle frane nel 2006.

#### 4. ANALISI DEI DATI PLUVIOMETRICI

Dall'analisi dei dati sulla franosità e sull'uso del suolo è quindi evidente il maggiore incremento di franosità registrato sui terreni coltivati, ed in particolare l'elevata inci-

denza di frane sul nuovo seminativo. L'analisi delle relazioni tra franosità e uso del suolo non può tuttavia prescindere dallo studio delle precipitazioni che rappresentano nell'area di studio il principale fattore d'innescamento delle frane.

I dati di pioggia giornalieri disponibili per l'area di studio provengono dalla stazione pluviometrica di Rocchetta Sant'Antonio (SERVIZIO IDROGRAFICO NAZIONALE, 1955-2006) e coprono il periodo 1955 - 2006. La piovosità media annua è intorno ai 670 mm (con intervallo di variabilità tra 449 e 1037 mm nei 52 anni considerati). Inverno ed autunno sono le stagioni più piovose con piovosità media di, rispettivamente, 204 mm (intervallo 75-470 mm) e 195 mm (intervallo 64-360 mm), mentre l'estate è la stagione meno piovosa, con una media di 104 mm (intervallo 24-266). Il mese di massima piovosità è novembre con precipitazioni medie di 79 mm, seguito da dicembre con una media di 77 mm; tuttavia, le maggiori precipitazioni mensili, nei 52 anni esaminati, si sono verificate nel mese di gennaio 2003 con 218 mm. I mesi estivi di giugno, luglio e agosto sono tipicamente molto secchi e il mese di luglio è caratterizzato dal più basso tasso di precipitazioni, in media 31 mm (Fig. 13).

Dall'analisi dei dati è emerso che le stagioni invernali tra la fine del 2002 ed il 2006 hanno contribuito ad una fase piovosa, seguita peraltro ad un periodo di grave siccità, e nel contesto di una tendenza al calo pluviometrico sul lungo periodo (POLEMIO & CASARANO, 2008). Ad esempio, il trimestre invernale dicembre 2002-febbraio 2003 è stato il più piovoso in assoluto nei 52 anni considerati (360 mm). Inoltre l'inverno 2005-2006, ovvero il periodo immediatamente precedente all'acquisizione dell'immagine IKONOS utilizzata per il più recente inventario delle frane, è stato caratterizzato da precipitazioni ben al di sopra della media (299 mm). Al contrario il periodo invernale 2001-2002 era stato tra i meno piovosi, 123 mm.

Altro dato importante è che il 1976 e la sua estate hanno segnato valori record di piovosità (rispettivamente 1037 e 266 mm). Per di più, la maggior parte delle precipitazioni dell'estate del 1976 si sono verificate nei mesi di giugno e luglio, ovvero immediatamente prima dell'acquisizione delle foto aeree utilizzate per l'inventario delle frane del 1976.

Pertanto, sebbene le immagini utilizzate per i due inventari delle frane siano state acquisite in stagioni generalmente segnate da andamenti delle precipitazioni molto diversi, sia le foto aeree del 1976 sia l'immagine del 2006 sono state acquisite poco dopo periodi piovosi durati alcuni mesi, con condizioni favorevoli al dissesto (in particolare per movimenti superficiali).

Poichè nelle immagini analizzate si sono riconosciuti come attivi i movimenti franosi avvenuti principalmente nell'ultima stagione piovosa, sono state esaminate le quantità di precipitazioni cadute nei mesi

precedenti l'acquisizione delle foto aeree (luglio 1976) e delle immagini IKONOS (aprile 2006). Considerando il periodo (che include la stagione più piovosa) da ottobre dell'anno precedente alla data dell'acquisizione, i dati registrati sono, per il 1976 e il 2006, rispettivamente di 775 e 580 mm. Considerando invece il semestre precedente all'acquisizione, si registrano rispettivamente valori di 421 e 520 mm. È stato inoltre effettuato, nei periodi considerati, un confronto tra i principali eventi piovosi, al fine di individuare eventuali particolarità che possano spiegare il considerevole aumento della franosità attiva individuato nelle immagini del 2006. Trattandosi di frane essenzialmente superficiali, queste possono essere infatti innescate da precipitazioni di relativamente breve durata. I risultati riportati nella Tabella 5 mostrano che nella stagione 1975-76 ci sono stati 5 eventi tra i 40 ed i 60 mm e 2 eventi superiori, con un massimo di 90.8 mm; nella stagione 2005-2006 ci sono stati invece 2 eventi tra i 40 e i 60 mm e 3 eventi superiori, con un massimo di 98.6 mm.

La piovosità nei semestri ottobre-marzo prece-

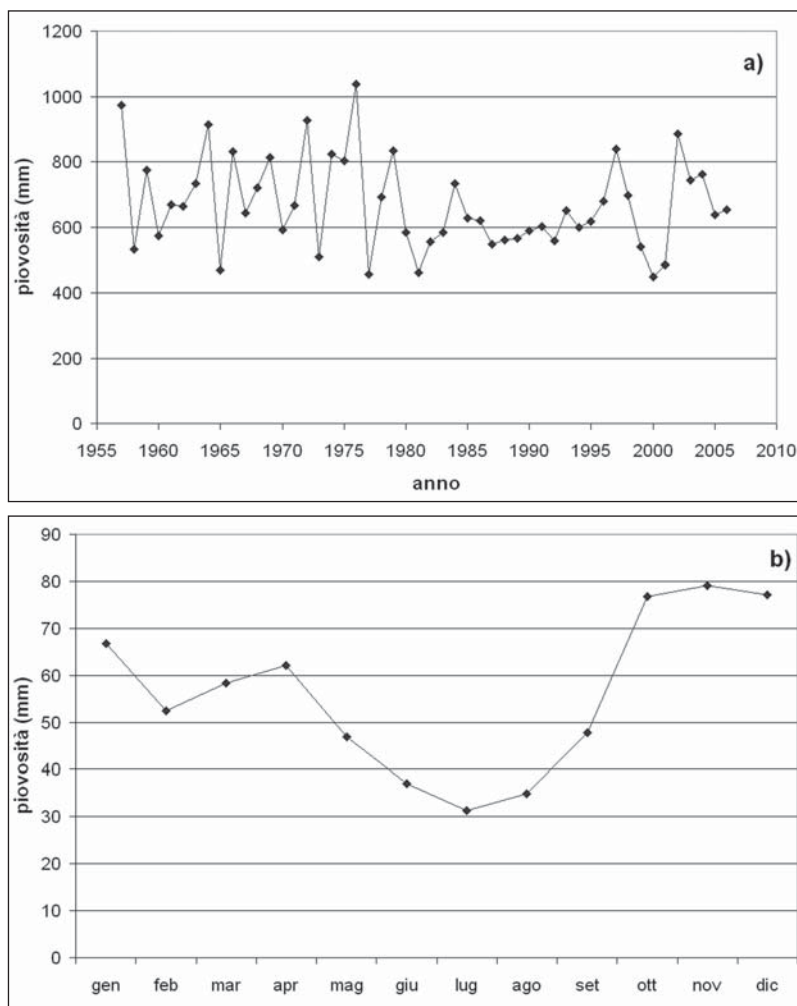


Fig. 13 - a) Andamento delle precipitazioni annue registrate dalla stazione di Rocchetta Sant'Antonio dal 1955 al 2006. b) Andamento delle precipitazioni medie mensili ottenute a partire dai dati giornalieri registrati dalla stazione di Rocchetta Sant'Antonio dal 1955 al 2006.

a) Variation in average yearly precipitation registered in Rocchetta S. Antonio from 1955 to 2006. b) Average monthly precipitation obtained from daily data registered in Rocchetta S. Antonio from 1955 to 2006.



Tab. 5 - Principali eventi piovosi registrati a Rocchetta Sant'Antonio nel periodo antecedente all'acquisizione delle foto aeree del 1976 e all'acquisizione dell'immagine IKONOS del 2006.

Main rainfall events registered in Rocchetta S. Antonio in the periods preceding the acquisition of 1976 airphotos and 2006 IKONOS imagery.

1975-1976	12-21 ott	15-19 nov	11-13 dic	28 gen	9-11 apr	5-8 giu	29 giu-3 lug
Quantità (mm)	90.8	54.8	84.4	50.2	41.4	40.0	50.8
2005-2006	7-10 ott	9-13 dic	23-28 feb	10-12 mar	22-24 mar		
Quantità (mm)	64.8	77.6	98.6	42.2	43.4		

denti ai cataloghi delle frane è stata valutata anche tenendo conto dell'evapotraspirazione per stimare la quantità di acqua disponibile per il deflusso e per la ricarica idrica del suolo. Si è considerato il periodo ottobre-marzo perchè coincide con la stagione della ricarica in cui cioè l'evapotraspirazione potenziale è minore della piovosità media e l'evapotraspirazione potenziale coincide con quella reale. Per calcolare l'evapotraspirazione potenziale media giornaliera è stata usata la formula di Hargreaves Samani (HARGREAVES & SAMANI, 1982; 1985):

$$E_p = 0.0023 \frac{R_a}{\lambda} \sqrt{T_d} (T + 17.8)$$

dove

$E_p$  = evapotraspirazione potenziale;

$T_d$  = temperatura giornaliera massima meno temperatura giornaliera minima;

$T$  = temperatura giornaliera media;

$R_a$  = radiazione solare extraterrestre, ovvero l'energia che incide giornalmente sulla superficie di un m<sup>2</sup> posta orizzontalmente al di fuori dell'atmosfera, (l'effetto della copertura nuvolosa, che riduce la radiazione al suolo, è stimato attraverso l'escursione termica giornaliera);

$\lambda$  = calore latente di evaporazione dell'acqua. Se  $R_a$  è espresso in MJ/m<sup>2</sup>, per ottenere l'evaporazione in mm,  $\lambda$  deve essere espresso in MJ/kg (1 kg/m<sup>2</sup> = 1 mm di acqua evaporata).

Si è quindi calcolata la piovosità utile data dalla piovosità meno l'evapotraspirazione potenziale per i semestri ottobre-marzo dei seguenti anni: 1974-1975, 1975-1976, 2001-2002, 2002-2003, 2004-2005 e 2005-2006 (Fig. 14).

Si osserva che la piovosità utile nel 1975-1976 e nel 2005-2006 è, rispettivamente, di circa 300 mm e 360 mm. A fronte di una quantità d'acqua disponibile per il deflusso e per la ricarica idrica del suolo di circa il 20% superiore nella stagione 2005-2006 rispetto al 1975-1976, la franosità nel 2006 risulta quasi triplicata. A tale risultato contribuisce presumibilmente anche la differente distribuzione temporale della piovosità complessiva, con un maggior numero di periodi piovosi

nel 1976, ma con il 2006 caratterizzato da eventi di intensità superiore. Il ruolo scatenante delle precipitazioni è confermato, in misura comunque legata alla differente azione dei fattori predisponenti, tra i quali in particolare l'uso del suolo.

## 5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Questo lavoro ha integrato, sfruttando le potenzialità dell'ambiente GIS, dati di diverso tipo e origine. In particolare, la raccolta dei dati necessari per le carte inventario dei fenomeni franosi e per la mappatura dell'uso del suolo in diversi periodi, ha comportato sia l'indispensabile rilievo in sito, sia l'analisi di foto aeree ed immagini satellitari di diverso tipo e con differenti metodologie di trattamento.

Prima ancora di trarre delle conclusioni riguardanti caratteristiche e cause dell'instabilità dei versanti nell'area di studio, il lavoro suggerisce alcune valutazioni sulle tecniche e metodologie impiegate. In particolare, le immagini satellitari ad alta risoluzione, come quelle del satellite IKONOS, si possono considerare una valida alternativa alle foto aeree per la realizzazione di carte

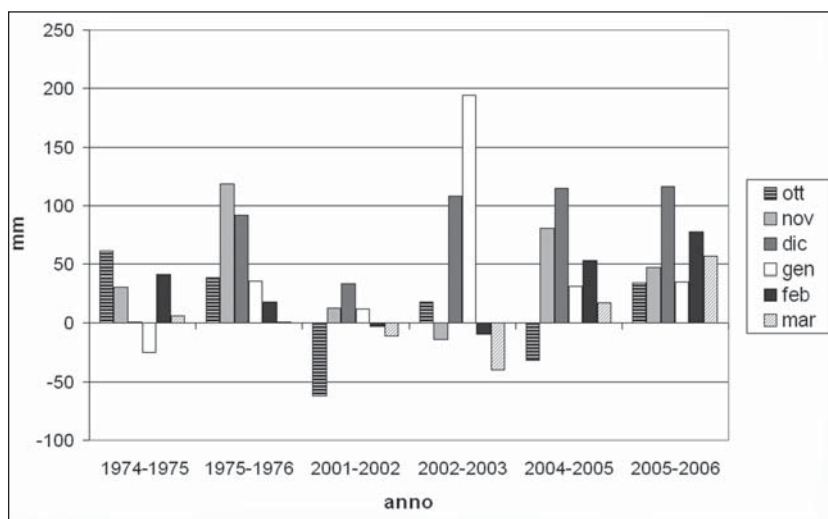


Fig. 14 - Piovosità utile su base mensile (differenza tra piovosità ed evapotraspirazione potenziale) per i periodi ottobre-marzo precedenti l'acquisizione delle immagini usate per produrre le carte inventario delle frane.

Net monthly rainfall, i.e., the difference between rainfall and potential evapotranspiration for the October-March periods preceding the acquisition of the imagery used to produce landslide inventories.

inventario delle frane attive ad una scala di dettaglio, permettendo di cartografare e posizionare con precisione dissesti anche di piccola estensione. Fra i vantaggi dell'uso di immagini da satellite, si ha che una singola immagine ricopre grandi aree eliminando quindi la necessità di elaborare fotografie aeree multiple con i problemi collegati, come la necessità di creare mosaici di foto adiacenti a volte acquisite anche a settimane o mesi di distanza. Inoltre l'uso di una singola immagine, comprendente una vasta area, riduce significativamente il volume di dati da elaborare per effettuarne l'ortorettificazione. Infine, le immagini satellitari possono essere acquisite con tempi di rivisitazione inferiori a quelli necessari a ripetere una campagna aerofotogrammetrica.

Tuttavia, le immagini satellitari stereoscopiche ad alta risoluzione sono ancora costose rispetto alle immagini aeree e non sono state utilizzate nel presente lavoro. Per consentire una visualizzazione tridimensionale le immagini satellitari si sono sovrapposte al DTM; la limitazione nell'interpretazione degli elementi distintivi morfologici dei movimenti di versante inattivi, derivante dalla mancata applicazione della modalità stereoscopica, non è stata eccessivamente penalizzante in questo studio, focalizzato sulle frane attive; tuttavia, la stereoscopia avrebbe verosimilmente permesso un riconoscimento e una mappatura più rapida dei fenomeni franosi, a parità di dettaglio.

Confrontando le carte inventario delle frane del 1976, del 2005 (risultante da rilievi sul campo) e del 2006 (immagine IKONOS) si osserva che in molti casi i movimenti franosi tendono ad avvenire nella stessa area. Ciò è in parte dovuto alla presenza di vecchi movimenti che riducono la resistenza al taglio dei materiali coinvolti lungo le superfici di rottura e sviluppano fessure nel terreno che facilitano l'infiltrazione delle acque meteoriche e la saturazione del suolo.

Tuttavia, il confronto tra i dati del 1976 e del 2006 mostra un deciso incremento dell'attività franosa, con un aumento del 160% della frequenza areale delle frane attive (dal 2% al 5.2%). La tendenza opposta registrata per le frane inattive (che passano dal 7.1% all'1.6%) può essere solo in parte spiegata dalle limitazioni nell'osservazione delle frane inattive dovute alla mancanza del dato stereoscopico nell'immagine IKONOS; la percentuale di frane inattive nel 2006 risulta inferiore anche a causa della riattivazione di alcune frane inattive nel 1976.

Dai rilevamenti effettuati nell'area di studio si può affermare che l'innescò della maggior parte dei fenomeni di dissesto attivi negli ultimi anni ha seguito una serie di inverni piovosi (in particolare le stagioni 2002-2003 e 2005-2006). E' quindi possibile individuare nelle precipitazioni un ruolo scatenante sull'instabilità dei pendii già intrinsecamente "indeboliti" da altre cause.

I risultati di questo lavoro mostrano che i cambiamenti dell'uso del suolo nei 30 anni considerati sono ben correlati con l'incremento della frequenza areale delle frane attive nella Daunia. Nel territorio di Rocchetta dal 1976 al 2006 vi è stato un incremento del 46% dei seminativi (dal 52% al 75% dell'area complessiva). Le zone alberate sono passate dal 9% nel 1976 al 5% nel 2006; l'allargamento delle aree adibite a seminativo è andato soprattutto a scapito dell'estensione delle aree incolte.

L'impatto del cambiamento dell'uso del suolo sulla stabilità dei pendii è facilmente dimostrabile. I terreni divenuti agricoli dopo il 1976 («nuovo seminativo»), registrano un aumento della franosità del 161%, mentre quelli seminati già nel 1976 hanno registrato un incremento della franosità del 181%. Tuttavia si osserva come le zone non ancora coltivate nel 1976, e invece adibite in seguito a seminativo, mostrassero già inizialmente una maggiore franosità, e che questa sia cresciuta in proporzione in conseguenza di periodi piovosi come l'inverno 2005-2006. Sulle «restanti aree» (non seminate nel 1976 e neppure oggi) l'aumento della franosità dal 1976 al 2006 è stato invece del 98%, nettamente minore rispetto a quello verificatosi sui seminativi.

Inoltre, si è verificato che l'estensione dei seminativi è avvenuta su terreni con pendenza mediamente superiore a quella dei suoli già coltivati. Se nel «vecchio seminativo» (1976) poco più del 25% si trovava su pendenze oltre i 10°, e quasi mai superiori ai 15°, il nuovo seminativo è per il 45% su pendenze oltre i 10°, e per quasi il 10% oltre i 15°. Appare quindi chiaro che coltivazioni su pendenze elevate, dapprima marginali, attualmente riguardano porzioni significative del territorio. Tutto ciò indica che l'incremento complessivo delle frane attive è stato favorito dall'estensione delle coltivazioni su terreni più ripidi e presumibilmente meno stabili; il «nuovo seminativo» ha occupato aree più franose già prima di essere coltivate (2.9% di area in frana contro 1.8% dei vecchi seminativi come osservato nel 1976). L'aver esteso le coltivazioni ad aree con pendenze più elevate ha ulteriormente aggravato la situazione di pendii già originariamente più instabili.

In conclusione, i diffusi fenomeni di dissesto che hanno interessato l'area di studio negli ultimi anni sono stati innescati da precipitazioni superiori alla media. Comunque stabilire l'impatto delle variazioni climatiche sulle frane può essere complesso se si considerano pendii modificati dall'uomo, poiché tali modifiche possono sia migliorare che peggiorare la stabilità dei pendii con una rapidità maggiore di quella dei recenti cambiamenti climatici o geomorfologici. Sembra inoltre che, nell'analisi predittiva dell'impatto dei cambiamenti climatici sulla franosità, molta attenzione debba essere prestata al periodo immediatamente successivo ad ogni modificazione importante dell'assetto del pendio, sia di origine antropica (es. agricoltura intensiva) che di origine naturale (es. eventi piovosi estremi o terremoti di alta magnitudo). Ci sono indicazioni che a seguito di tali modificazioni le soglie di suscettibilità al dissesto possano essere alterate significativamente rispetto a quelle basate sui precedenti dati storici di piovosità e dei dissesti associati alla piovosità stessa (ad es. WASOWSKI, 1998; PARISE & WASOWSKI, 1999).

Nella maggior parte dell'area di studio il numero e l'estensione dei fenomeni di dissesto sono da ricondursi a concause determinate dall'intervento antropico. La deforestazione può essere storicamente considerata come uno dei principali fattori che hanno contribuito alla franosità della Daunia, così come di altre parti dell'Italia Meridionale (ad es. PARISE & WASOWSKI, 2000). Inoltre, insieme all'estensione del seminativo su pendenze elevate, seguita alle politiche europee di sostegno alla coltivazione del grano duro attuate dagli anni '70, vanno considerate le tecniche di aratura e le modificazioni introdotte dalla pratica agricola nella gestione

del reticolo idrografico lungo i versanti. Le arature con i mezzi meccanici più moderni, in particolare quelli capaci di arature profonde, hanno segnato un ulteriore cambio delle caratteristiche geotecniche, ed un calo della resistenza del suolo. Pertanto l'aratura sui pendii più ripidi ed in particolare le nuove arature (che hanno rimosso la vegetazione naturale esistente) che hanno come obiettivo i pendii più ripidi ancora disponibili per l'agricoltura, hanno avuto come risultato una aumentata erosione e franosità superficiale. La stabilità del territorio è stata compromessa anche dall'abbandono di opere di presidio contro l'erosione, create e faticosamente mantenute in passato da generazioni di agricoltori.

La frequenza areale delle frane attive ha raggiunto, sulle aree del "nuovo seminativo" con pendenza superiore ai 10°, valori superiori all'11%. La crescita della percentuale di area in frana all'aumentare della pendenza del versante coltivato è molto rapida quando si supera la soglia dei 10°. Questo suggerisce un'attenta valutazione dell'opportunità e delle eventuali modalità della pratica cerealicola su tali versanti. Oltre che dal rispetto delle norme, tale valutazione non può prescindere dai costi che ricadono sulla collettività, per la messa in sicurezza e il ripristino di dissesti derivanti da un'inadeguata gestione del territorio.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'amministrazione comunale di Rocchetta Sant'Antonio ed in particolare il Dott. A. Magnotta, l'Ing. G. Amoruso e l'Ing. G. Tedeschi della Regione Puglia, e il Dott. G. Rampino per aver fornito alcuni dati usati in questo studio. Inoltre si ringraziano il Prof. Franco Loiacono e il Dott. Paolo Giannandrea per le proficue discussioni sulla geologia locale dell'area di studio. Infine siamo grati ai due referee anonimi per gli utili suggerimenti fornitici.

## BIBLIOGRAFIA

- BEGUERIA S. (2006) - *Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees*. *Geomorphology*, **74**, 196–206.
- CANNON S.H. (2000) - *Debris flow response of southern California watersheds burned by wildfire*. In: Wieczorek, G.F., Naeser, N.D. (Eds.), *Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Balkema, Rotterdam, pp. 45–52.
- CIARCIA S., DI NOCERA S., MATANO F. & TORRE M. (2003) - *Evoluzione tettono-sedimentaria e paleogeografica dei depocentri "wedge-top" nell'ambito del "foreland basin system" pliocenico dell'Appennino meridionale (settore Irpino-Dauno)* - *Boll. Soc. Geol. It.*, **122**, 117-137.
- CONFORTI P. (2002) - *Working paper n.14 - Un'analisi dell'ipotesi di riduzione del sostegno al grano duro nell'unione europea e dei suoi effetti in Italia*. Istituto Nazionale di Economia Agraria-Osservatorio sulle Politiche Agricole dell'Unione Europea.
- COTECCHIA V. (1963) - *I dissesti franosi del Subappennino Dauno con riguardo alle strade provinciali* - *La Capitanata*, **1** (5-6), Foggia.
- CROSTELLA A. & VEZZANI L. (1964) - *La geologia dell'Appennino foggiano* - *Boll. Soc. Geol. It.*, **83**, 121-142.
- DEGRAFF J.V. & CANUTI P. (1988) - *Using isopleth mapping to evaluate landslide activity in relation to agricultural practices* - *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **38**, N.ro 1, 61-71.
- DI NOCERA S. & TORRE M. (1987) - *Geologia dell'area compresa tra Deliceto e Scampitella (Appennino Foggiano)* - *Boll. Soc. Geol. It.*, vol. 106, fasc. **2**, 351-364.
- DAZZARO L. & RAPISARDI L. (1987) - *Osservazioni geologiche sull'Appennino Dauno* - *Mem. Soc. Geol. It.*, **38**, 241-246.
- DAZZARO L., DI NOCERA S., PESCATORE T., RAPISARDI L., ROMEO M., RUSSO B., SENATORE M.R. & TORRE M. (1988) - *Geologia del margine della catena appenninica tra il F. Fortore ed il T. Calaggio (Monti della Daunia - Appennino Meridionale)* - *Mem. Soc. Geol. It.* 41: 411-422.
- GISOTTI E ZARLENGA (2004) - *Geologia Ambientale, principi e metodi*. Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- GLADE T. (2003) - *Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand*. *Catena* **51**, 297–314.
- GOKCEOGLU C. & AKSOY H. (1996) - *Landslide Susceptibility Mapping of the Slopes in the Residual Soils of the Mengen Region (Turkey) by Deterministic Stability Analyses and Image Processing Techniques*. *Engineering Geology*, **44**, 147–161.
- GOSTELOW P. & WASOWSKI J. (2004) - *Ground surface changes detectable by earth observation and their impact on the stability of slopes* - *Polish Geol. Inst. Sp. Papers* 15: 43–52.
- HARGREAVES G.H. & SAMANI Z.A. (1982) - *Estimating potential evapotranspiration* - *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, **108** (IR3):223-230.
- HARGREAVES G.H. & SAMANI Z.A. (1985) - *Reference crop evapotranspiration from temperature* - *Transaction of ASAE* **1**(2):96-99.
- IOVINE G., PARISE M. & CRESCENZI E. (1996) - *Analisi della franosità nel settore centrale dell'Appennino Dauno* - *Mem. Soc. Geol. It.* **51**: 633-641.
- JACOBACCI A. & MARTELLI G. (1967) - *Note illustrative del foglio 174, Ariano Irpino*. Servizio Geologico d'Italia, Roma.
- LAMANNA C. (2008) - *Uso del suolo e franosità nell'Appennino Dauno* - Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali, Università di Bari.
- MALAMUD B. D., TURCOTTE D. L., GUZZETTI F. & REICHENBACH P. (2004) - *Landslide inventories and their statistical properties* - *Earth Surface Processes and Landforms* **29**, 687–711.
- MALATESTA A., PERNO U. & STAMPANONI G. (1967) - *Note illustrative del foglio 175, Cerignola*. Servizio Geologico d'Italia, Roma.
- MANTOVANI F., SOETERS R. & VAN WESTEN C.J. (1996) - *Remote Sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe*. *Geomorphology* **15**, 213-225.
- MEHROTRA G., KANUNGO D. & MAHADEVIAH K. (1996) - *Landslide hazard assessment - a need for environ-*



- mental management*. Proc. 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, pp. 315–320.
- MOSSA S., CAPOLONGO D., PENNETTA L. & WASOWSKI J. (2005) - *A GIS-based assessment of landsliding in the Daunia Apennines, southern Italy* - Proc. Intern. Conf. "Mass movement hazard in various environments" 20-21 October 2005, Cracovia, Polonia.
- MOSTARDINI F. & MERLINI S. (1986) - *Appennino Centro-Meridionale. Sezioni geologiche e proposta di modello strutturale* - Mem. Soc. Geol. It., **35**, 177-202.
- NICHOL J. E., SHAKER A. & WONG M. S. (2006) - *Application of high-resolution stereo satellite images to detailed landslide hazard assessment* - *Geomorphology* **76**, 68–75.
- PARISE M. & WASOWSKI J. (1999) - *Use of landslide activity maps for the evaluation of landslide hazard: three case studies from southern Italy* - *Natural Hazards* **20**: 159-183.
- PARISE M. & WASOWSKI J. (2000) - *Fenomeni di dissesto nell'Appennino Dauno, ed implicazioni per il patrimonio archeologico e storico-culturale* - Atti Convegno Geo-Ben, Torino.
- POLEMIO M. & CASARANO D. (2008) - *Climate change, drought and groundwater availability in southern Italy* - Geological Society, London, Special Publications 2008; v. 288; p. 39-51.
- SELBY M. (1993) - *Hillslope Materials and Processes*. Oxford Univ. Press, Oxford.
- SERVIZIO IDROGRAFICO NAZIONALE (1955-2006) - *Annali idrologici dei bacini con foce al litorale adriatico e ionico dal Candelaro al Lato* - Sez. Idrogr. di Bari, Fasc. VIII, Ist. Poligr. dello Stato, Roma.
- SIDLE R.C., PEARCE A.J. & O'LOUGHLIN C.L. (1985) - *Hillslope Stability and Land Use*. Water 608 Resources Monograph, vol. 11. American Geophysical Union, Washington, DC, 140 pp.
- SOETERS R. & VAN WESTEN C.J. (1996) - *Slope instability recognition, analysis and zonation* - In A.K. Turner & R.L. Schuster (eds), *Landslide investigation and mitigation, NRC, Transportation Research Board Special Report 247*, Washington, 129-177.
- VAN WESTEN C.J., CASTELLANOS E. & KURIAKOSE S.L. (2008) - *Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview* - *Engineering Geology* **102**: 112-131.
- WASOWSKI J. (1998) - *Understanding landslide-rainfall relationships in man-modified environments: a case history from Caramanico Terme (Italy)* - *Environmental Geology* **35**: 197-209.
- WASOWSKI J., CASARANO D. & LAMANNA C. (2007) - *Is the current landslide activity in the Daunia region (Italy) controlled by climate or land use change?* - Proceedings of the International Conference on Landslides and Climate Change, Ventor, Isle of Wight, UK, 21-24 May 2007, 41-49.
- WIECZOREK G.F. (1984) - *Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction* - *Bull. Int. Ass. Geol.* **3**: 337-342.
- WP/WLI (1993) - International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory. *A suggested method for description the activity of a landslide*. IAEG Bull., **47**: 53-57.
- ZEZZA F., MERENDA L., BRUNO G., CRESCENZI E. & IOVINE G. (1994) - *Condizioni di instabilità e rischio da frana nei comuni dell'Appennino Dauno Pugliese* - *Geologia Applicata e Idrogeologia*, **29**: 77-141.

Ms. ricevuto il 10 novembre 2008  
 Testo definitivo ricevuto il 21 aprile 2009

Ms. received: November 10, 2008  
 Final text received: April 21, 2009