

DARIO COSTANZO, CHRISTIAN CONOSCENTI,
EDOARDO ROTIGLIANO & VALERIO AGNESI

UTILIZZO DEL SISTEMA GOOGLE EARTH™
PER LA DEFINIZIONE DI UN MODELLO DI SUSCETTIBILITÀ
DA FRANA: UN TEST IN SICILIA CENTRALE

RIASSUNTO

Nell'ambito di un progetto finalizzato alla messa a punto di una metodologia per la valutazione a scala regionale della pericolosità da frana, è stata condotta una ricerca, con lo scopo di valutare la consistenza dell'approccio basato sull'analisi condizionale e la possibilità di utilizzare il sistema Google Earth™ per la costruzione di archivi frane. L'area di applicazione, coincidente con il bacino idrografico del Torrente Tumarrano (78 km²), affluente del Fiume Platani (Sicilia Centro-Meridionale), presenta un assetto geologico caratterizzato in prevalenza dall'affioramento di terreni argillosi della Fm. Flysch Numidico, della Fm. Terravecchia e di argille che, in seguito anche agli esiti di uno studio paleontologico-stratigrafico delle microfaune presenti, sono state datate come argille del Serravalliano-Tortoniano.

Su una porzione rappresentativa (20 km²) del bacino è stato dapprima condotto un rilevamento delle frane utilizzando foto-immagini del 2007, il cui scenario (344 frane) è stato confrontato con quello prodotto sulla base di rilevamenti condotti sul terreno, nello stesso anno, alla scala 1:10.000. I due archivi mostrano una pressoché completa sovrapposibilità, ed hanno confortato il successivo utilizzo estensivo del sistema Google Earth™, per la costruzione di un archivio frane per tutta l'area. Sulla scorta di questa verifica, si è, infatti, eseguito un rilevamento remoto delle frane alla data del 2006, che è stato esteso a tutto il bacino del Torrente Tumarrano e che ha messo in luce la presenza di 703 frane di colamento e 30 di scorrimento rotazionale.

La funzione utilizzata quale funzione previsionale, per la costruzione del modello di suscettibilità, è la densità di frana, corrispondente alla probabilità spaziale di un evento franoso, sotto la condizione determinata da alcuni fattori di controllo. I quattro parametri di controllo selezionati (litologia affiorante, pendenza, curvatura piana ed indice topografico di umidità) sono stati ricavati da carte geologiche disponibili e da un DEM a cella 40 m appositamente realizzato; i parametri sono stati combinati producendo un *layer informativo* di tipo GRID, le cui celle sono state raggruppate in unità di condizioni uniche (*UCU: Unique Conditions Units*), in funzione delle combinazioni specifiche ottenute. Dall'intersezione tra il GRID delle *UCU* e dell'archivio frane del 2006 è stata ricavato il valore di densità di frana, per ciascuna delle combinazioni di fattori ottenute. La carta di suscettibilità da frana prodotta è stata poi sottoposta a validazione utilizzando una partizione spaziale ran-

dom, per suddividere il layer delle UCU in un sub-layer *training* ed un sub-layer *test*. Sono state dunque ricostruite le curve di validazione (*success* e *prediction rate curves*), le cui caratteristiche morfometriche hanno confermato la buona capacità previsionale del modello ottenuto e l'adeguatezza del metodo utilizzato, della scelta dei fattori e del metodo di riconoscimento delle frane. È stata inoltre eseguita una validazione temporale del modello, sfruttando la disponibilità, all'interno della porzione rappresentativa, dell'archivio frane datato al 2007; questa ha fornito risultati altrettanto soddisfacenti, indicando anche una buona capacità previsionale rispetto ad una reale evoluzione temporale.

SUMMARY

Exploiting Google Earth™ to assess a landslide susceptibility model: a test in central Sicily. A landslide susceptibility multivariate model, based on the conditional analysis approach, has been derived in the Tumarrano river basin (about 78 km²), by intersecting a GIS grid layer, expressing some selected geo-environmental conditions (outcropping lithology, steepness, plan curvature and topographic wetness index), and a landslide vector archive, produced by a Google Earth™ aided remote survey. The analysis of the Google Earth™ images dated at 2006, allowed to recognize 733 landslides (30 rotational slides and 703 flows), almost exclusively affecting clay and sandy clay rocks. Validation procedures produced largely satisfactory results, which were analyzed in the domain of the success and prediction rate curves. The research confirms the goodness of the susceptibility assessment method, as well as the powerful of Google Earth™ as a tool to manage the need of new, detailed and multi-temporal landslide archives.

INTRODUZIONE

La pericolosità da frana di un'area rappresenta la probabilità che un evento franoso, di una data intensità, avvenga al suo interno, in un determinato intervallo (VARNES & IAEG, 1984). Poiché il fattore probabilistico temporale è spesso di difficile determinazione, nella pratica si ricorre spesso al concetto di *suscettibilità* da frana, la quale descrive (BRABB, 1984; GUZZETTI, 1999) in termini qualitativi o quantitativi la distribuzione spaziale delle frane che insistono e/o possono verificarsi in un'area (FELL *et al.*, 2008). Una carta della suscettibilità da frana, quindi, descrive la distribuzione della probabilità spaziale (geografica), associata al verificarsi di una frana. Nel concetto di suscettibilità, ogni riferimento alla magnitudo dell'evento atteso è eventualmente affidato, in forma certamente qualitativa, alla caratterizzazione riguardante la tipologia di movimento, per la quale il modello è messo a punto, ed alle dimensioni medie dei volumi coinvolti negli eventi osservati.

Buona parte delle metodologie oggi utilizzate per la determinazione della suscettibilità da frana, si basa sull'individuazione e sulla caratterizzazione spaziale di un set di fattori di controllo, e sulla quantificazione delle relazioni spaziali intercorrenti tra questi ed un archivio di frane pregresse, sfruttando l'assunto che le frane future si realizzeranno sotto le stesse condizioni di quelle del passato (GUZZETTI *et al.*, 1999). Questo approccio trova una sua

naturale applicazione nei metodi indiretti basati sull'utilizzo dei sistemi GIS (FABBRI & CHUNG, 2003), sia per la definizione di modelli parametrici di tipo euristico, sia per la messa a punto di veri e propri modelli stocastici (CARRARA *et al.*, 1995; CHUNG & FABBRI, 1995; CONOSCENTI *et al.*, 2008a; VAN DEN EECKHAUT *et al.*, 2009).

Se, da una lato, sono oggi disponibili presso enti di ricerca e di gestione del territorio, corpose e sempre più dettagliate banche dati relativamente a fattori geologici, climatici, pedologici e topografici (DEM), per di più, spesso, in formato già digitale e georiferito, un forte problema nasce per le banche dati relative alle forme di dissesto. Varie esperienze sono state condotte in quest'ambito (progetti AVI, SCAI, IFFI e PAI), le quali tuttavia forniscono tipicamente un grado di affidabilità, precisione e, soprattutto, omogeneità temporale dell'archivio che, di fatto, suggerisce come necessaria, per scopi previsionali, l'esecuzione di nuovi rilevamenti (remoti e sul terreno) *ad hoc* per le aree di interesse. In questo senso, diventa necessario contemperare la necessità di costruire archivi delle frane sufficientemente attendibili e cronologicamente omogenei, con gli elevati costi di tempo e denaro derivanti dalla realizzazione di rilevamenti sistematici sul terreno.

Il presente lavoro mostra gli esiti di una ricerca condotta nel territorio siciliano, finalizzata a verificare la possibilità di definire le condizioni di suscettibilità da frana all'interno di un bacino idrografico campione, sfruttando il sistema (software e banca dati di foto-immagini satellitari) Google EarthTM; questo sembra infatti fornire un supporto di sicuro interesse in ambito previsionale, grazie alla estrema rapidità di accesso alle informazioni, alla versatilità di gestione ed analisi delle immagini 3D, alla immediata connessione con i sistemi GIS ed alla possibilità di selezionare per una stessa area più epoche di rilievo.

In particolare, di seguito, sarà illustrata una procedura per la definizione di un modello di suscettibilità da frana basato su unità di condizioni uniche (UCU), ricavate combinando quattro fattori di controllo (litologia affiorante, pendenza, curvatura piana e indice topografico di umidità) e che sfrutta un archivio delle frane ricostruito analizzando immagini del 2006. Il modello è sottoposto a validazione: sfruttando una partizione spaziale random delle UCU, nei confronti dell'archivio delle frane rilevate al 2006 (CONOSCENTI *et al.*, 2008b); utilizzando una partizione temporale pura delle frane, utilizzando un archivio delle frane rilevate al 2007, all'interno di un'area campione. In quest'ultima, nel 2007, è stato anche eseguito un rilevamento delle frane diretto sul terreno alla scala 1:10.000, la cui distribuzione è stata preliminarmente confrontata con quella ricavata da Google EarthTM, per verificare l'attendibilità di quest'ultimo e, dunque, dell'archivio totale del 2006.

MATERIALI E METODI

Inquadramento dell'area

L'area di applicazione è costituita dal bacino idrografico del Torrente Tumarrano, che si estende per circa 78 km² in Sicilia centro-meridionale (Fig. 1a). Il bacino del Torrente Tumarrano è caratterizzato dall'affioramento di (Fig. 1b): terreni in prevalenza argillosi e sabbiosi del Flysch

Numidico (Oligocene sup. - Miocene inf.), presenti estesamente nel bacino, a luoghi anche in forma di livelli sabbioso-arenacei e banchi quarza-renitici di spessore metrico, derivanti dalla deformazione dei terreni delle Unità Imeresi più recenti; seguono stratigraficamente terreni costituiti in prevalenza da breccie argillose di colore brunastro con inclusi litoidi di varia età, dimensione e natura, con aspetto caotico e caratterizzati da brusche variazioni di spessore (Argille del Serravalliano), derivanti dalla deformazione delle Unità Sicilidi; depositi terrigeni appartenenti alla Fm. Terravecchia (Torto-

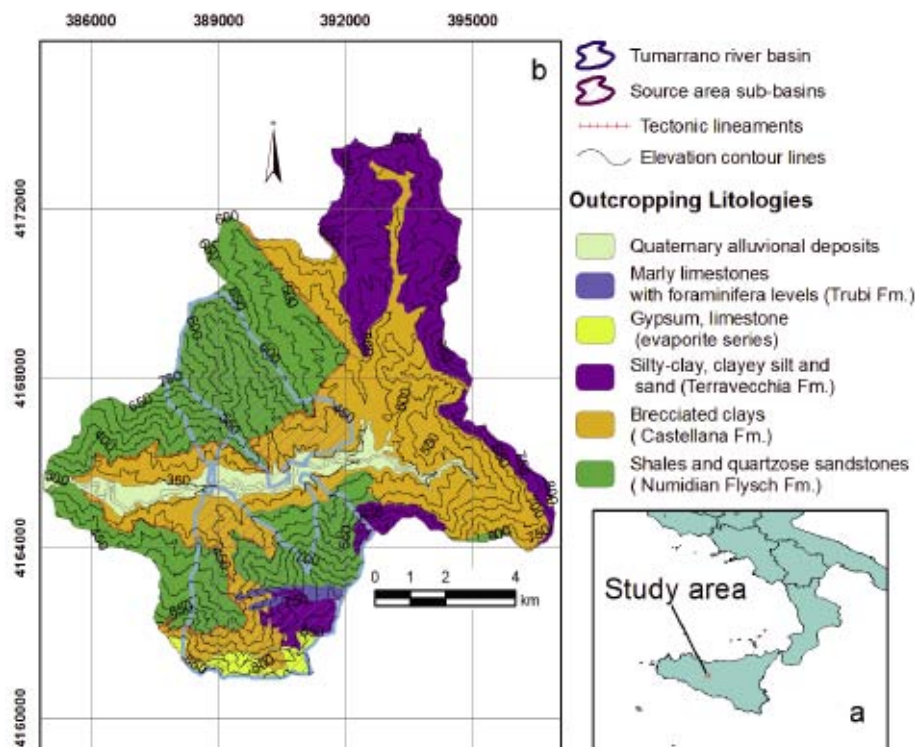


Fig. 1 — a) Bacino del fiume Platani e ubicazione della zona di studio; b) il quadro geologico del bacino Tumarrano

niano), che affiorano prevalentemente nella porzione settentrionale, sotto forma di un complesso giallastro sabbioso-arenaceo, separato da livelli marinosi poco compatti.

Sopra la Fm. Terravecchia, nell'estremo settore meridionale del bacino, si trovano i depositi Evaporitici del Messiniano. La sequenza evaporitica è chiusa, in discordanza, dai Trubi che sigillano le sequenze sottostanti. In successione, si trovano poi i depositi olocenici e i depositi alluvionali attuali e recenti, affioranti in prevalenza nelle aree adiacenti al letto del T.te Tumarrano.

Archivio delle frane

Per avere un quadro dei dissesti aggiornato, con un dettaglio adeguato e per il quale fosse garantita l'omogeneità temporale, si è costruito un database dei dissesti dell'intero bacino, utilizzando un applicativo GIS e una banca dati di immagini satellitari, che permette l'osservazione remota del territorio, con una buona risoluzione e con la possibilità di selezionare epoche di osservazione differenti: il sistema Google EarthTM (di seguito GE). Utilizzando questo sistema di analisi del territorio, si è dapprima realizzato un archivio delle frane, limitato solo ad un suo settore rappresentativo, datato al 2007 e che ha messo in evidenza la presenza di 344 frane (318 colamenti e 26 scorrimenti rotazionali; CRUDEN & VARNES, 1996). Questo archivio è stato sottoposto a verifica, confrontandolo con quello ricavato da indagini condotte sul campo, nello stesso anno, alla scala 1:10.000. Il confronto delle carte inventario (Fig. 2) ha messo in evidenza la buona attendibilità del rilevamento remoto, confortando il passo successivo, nel quale si è invece eseguita la mappatura dei dissesti su tutto il bacino.

L'archivio frane esteso a tutta l'area del bacino è stato ricavato dall'analisi di foto-immagini dell'Agosto del 2006 ed ha messo in luce la presenza di un numero totale di frane pari a 733.

In Fig. 3 vengono mostrati i dissesti riconosciuti per il bacino del T.te Tumarrano dalla copertura fotografica del 2006. Il rilevamento condotto ha messo in luce come le 733 frane riconosciute all'interno del bacino, siano suddivise in 703 colamenti e 30 scorrimenti rotazionali; il materiale coinvolto rientra sempre nelle tipologie terra o, subordinatamente, detrito. Le caratteristiche medie delle frane mappate mettono in luce una estensione dell'area in frana pari a circa 4.7 km² e 0.96 km², con valori singoli massimi pari 143.468 m² e 90.508 m², per i colamenti e gli scorrimenti rotazionali, rispettivamente. Alla luce del rilevamento, dunque, l'area è caratterizzata da una densità di frana pari, rispettivamente, a 8.97% e 1.02%.

Dal punto di vista delle litologie interessate, il 41% delle frane di colamento interessa i termini argillosi del Flysch Numidico, il 30%, le argille Ser-

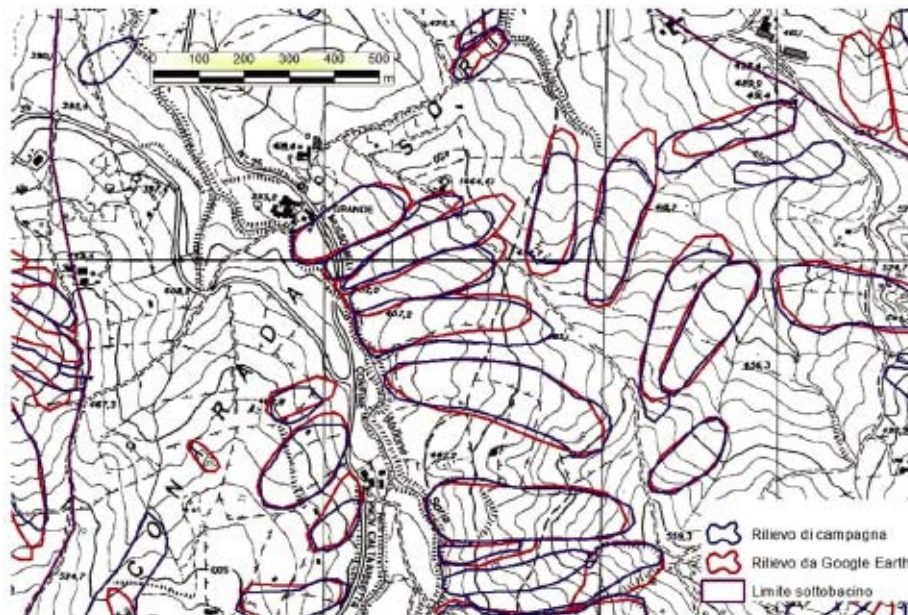


Fig. 2 — Confronto tra l'archivio frane (2007) ottenuto dal rilevamento di campagna e l'archivio frane realizzato con rilevamento remoto, in un'area campione.

ravalliane ed il 18% le argille siltose della Formazione Terravecchia. Le frane di scorrimento rotazionale risultano invece concentrarsi (67%) sui termini argillosi del Flysch Numidico e, subordinatamente, sui termini argillosi sottoposti alla Fm. Terravecchia (20%).

Nell'area sono anche stati osservati accumuli prodotti da fenomeni di crollo, i quali, tuttavia, non sono stati inclusi nel modello di suscettibilità, data la specificità dei fattori di controllo da prendere in considerazione (dati strutturali e definizione delle traiettorie possibili dei blocchi, etc.).

Fattori di controllo

Nella definizione del modello di suscettibilità è necessario trovare un compromesso tra il numero di fattori presi in considerazione, e di classi con le quali ciascuno dei fattori è rappresentato, ed il numero di unità statistiche (UCU) prodotte. Se da un lato un numero elevato di fattori e di classi di riclassificazione sembrerebbe garantire al modello il massimo della risoluzione, un approccio basato sull'analisi condizionale richiede che le combinazioni di fattori ottenute abbiano aree totali sufficienti da poterne "osservare" il comportamento su un numero di casi (celle) il più possibile ampio. Attraverso procedure di calibrazione per prova ed errore, è necessario individuare un numero di fattori e di

classi di riclassificazione minimo, ma certamente in grado di produrre UCU sufficientemente discriminate in termini di condizioni di franosità; in questo modo si determina una maggiore estensione media delle UCU e, dunque, una maggiore probabilità per le stesse UCU di essere “ben allenate” dal modello.

Nel bacino del T.te Tumarrano, sulla base delle tipologie di movimento per le quali è stato progettato il modello, i parametri selezionati quali indici dei fattori di controllo delle condizioni di stabilità dei versanti sono: la pendenza (SLO); l'indice topografico di umidità (TWI); la curvatura piana (CUR); il comportamento litotecnico atteso (LIT). I parametri SLO, TWI e CUR sono calcolati direttamente a partire da un modello digitale di terreno a cella quadrata di lato 40m, ricavato digitalizzando isoipse e punti quotati, a partire dalla copertura georiferita delle carte tecniche regionali in scala 1:10.000, prodotte dall'Assessorato al Territorio e all'Ambiente della Regione Siciliana. Il fattore LIT è stato invece ricavato dalla carta dei litotipi affioranti nell'area, messa a punto utilizzando carte e dati di letteratura e rilievi geologici appositamente eseguiti sul terreno.

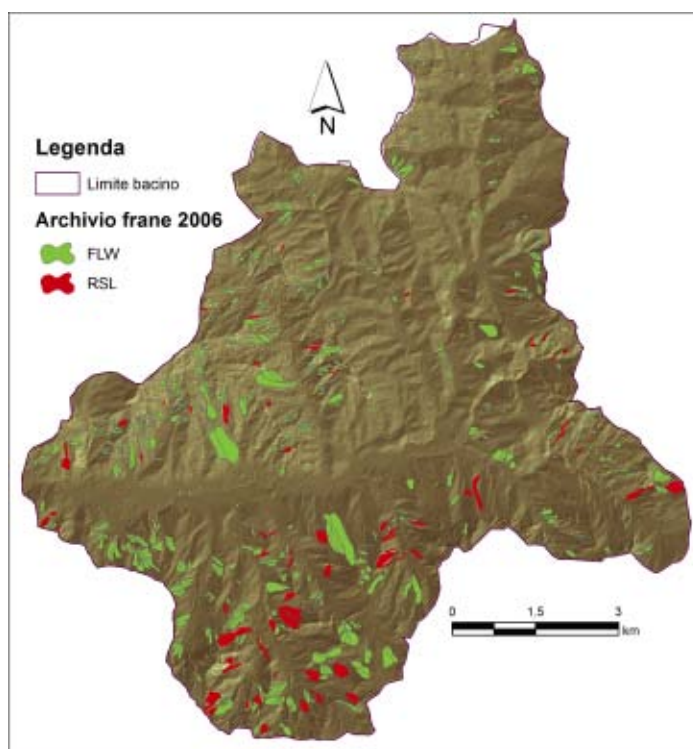


Fig. 3 — Distribuzione spaziale e frequenza delle forme di dissesto gravitativo.

In Fig. 4 viene mostrato l'andamento dei quattro parametri di controllo nell'area. Il parametro SLO costituisce il parametro più largamente utilizzato in letteratura per la valutazione della suscettibilità da frana: infatti, questo è indirettamente legato all'inclinazione dei possibili piani o orizzonti di rottura e, dunque, risulta normalmente correlato con la distribuzione delle frane.

Il layer della pendenza è espresso in formato GRID ed è stato ri-classificato secondo i seguenti intervalli: 0° - 5°; 5° - 10°; 10° - 20°; 20° - 30°; 30° - 45°. Il parametro TWI (*Topographic Wetness Index*), esprime sulla base delle condizioni topografiche del pendio, le quali controllano la geometria del ruscellamento, la quantità d'acqua che può infiltrarsi e saturare le rocce affioranti, differenziando dunque le celle nelle quali è suddiviso il versante, in funzione del grado di umidità o saturazione potenziale. La presenza di acqua influenza direttamente la stabilità dei terreni, poiché da una parte ne aumenta il peso di volume, dall'altra, modifica significativamente le resistenze disponibili su terreni a comportamento pseudo-coerente. Il calcolo del TWI è realizzato in maniera automatizzata a partire dal DEM (WILSON & GALLANT, 2000) utilizzando la relazione:

$$TWI = \ln (Ca / \tan \alpha)$$

dove Ca , indica l'area tributaria (*contributing area*) di ogni cella, e α indica l'angolo di pendenza della cella considerata.

L'andamento del TWI è naturalmente marcato dalla presenza delle linee di drenaggio superficiale, le quali hanno a loro disposizione estese aree di alimentazione e, allo stesso tempo, presentano valori di pendenza tanto più modesti, quanto maggiore è il loro ordine gerarchico. Ciò nondimeno, le variazioni del parametro di maggiore interesse in questa sede, sono quelle che caratterizzano i versanti nei quali possono osservarsi valori da bassi a medio – bassi a medio-alti.

Il parametro CUR, calcolato come derivata dell'esposizione del versante, ha consentito di discriminare versanti concavi, piani e convessi. Il parametro è stato calcolato utilizzando una relazione alle differenze finite che produce valori negativi, per le porzioni convesse, e valori positivi per i tratti di versante concavi. Si tratta di un parametro largamente utilizzato in letteratura (WILSON & GALLANT, 2000; OHLMACHER, 2007), poiché consente di caratterizzare le condizioni di suscettibilità in un punto di un versante, in dipendenza delle caratteristiche topografiche, analizzate ad una scala più generale.

Per quanto riguarda la caratterizzazione della litologia affiorante, è stata operata un accorpamento in complessi litotecnici, in funzione della risposta o comportamento meccanico atteso. In questo modo è stato possibile ridurre notevolmente il numero di classi, semplificando ed irrobustendo l'analisi geostatistica. Sono così state individuate le seguenti 4 classi: pseudocoerente, incoerente, semicoerente, coerente.

Dalla Fig. 4 osserviamo che la classe litotecnica predominante è quella

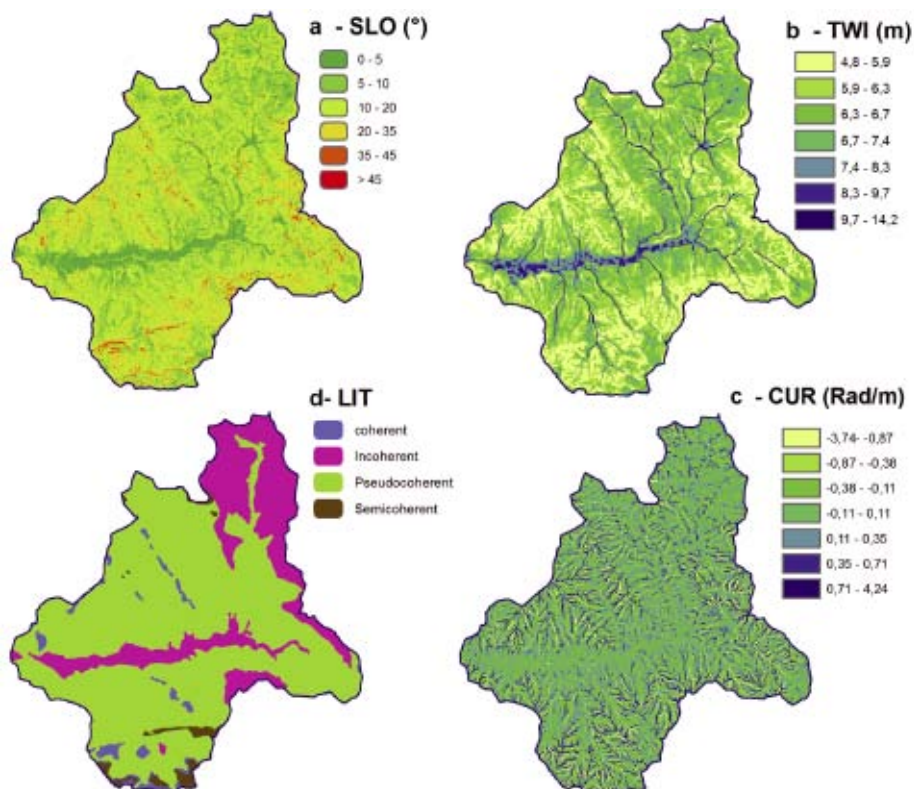


Fig. 4 — Distribuzione spaziale e la frequenza (tabella 1): a) il parametro SLO; b) il parametro TWI, c) il parametro CUR; d) il parametro LITO.

costituita dai terreni a comportamento pseudocoerente. Fanno parte di questa classe tutti i termini nei quali è presente una frazione argillosa abbondante: argille del Tortoniano, della Fm. Terravecchia e del Flysch Numidico. Per questa unità, l'elemento caratterizzante del comportamento meccanico è costituito dall'estrema variabilità della coesione e della resistenza al taglio, in funzione del contenuto in acqua. Al complesso coerente afferiscono i termini litologici costituiti dal calcare di base e dai banconi quarzo-arenitici, al complesso incoerente afferiscono i termini sabbiosi della Fm. Terravecchia e i depositi attuali e recenti, mentre ai termini semicoerenti afferiscono i calcari-marnosi della Fm. Trubi.

Una volta definiti i layers in formato GRID dei quattro fattori, si è proceduto alla loro combinazione in un unico strato informativo, il quale è costituito da un GRID le cui celle sono caratterizzate in funzione del tipo di combinazione dei fattori ottenuta (CARRARA *et al.*, 1995; CLERICI *et al.*, 2002;

IRIGARAY *et al.*, 2007). Si tratta dunque di un GRID rappresentante la distribuzione spaziale di unità di condizioni uniche (UCU).

La rappresentazione combinata delle caratteristiche fisico-ambientali, consente di fatto di condurre l'analisi della suscettibilità e di pervenire ad una caratterizzazione della stessa, secondo un approccio multivariato, che mette al riparo la capacità previsionale del modello rispetto ad effetti di correlazione incrociata tra i fattori stessi.

La combinazione dei quattro fattori in singole UCU, ha prodotto un numero molto elevato di domini omogenei (525 classi di combinazioni), ma assai inferiore al numero totale delle 1344 possibili combinazioni; tale circostanza costituisce una conferma della mutua dipendenza tra fattori e, dunque, della necessità di affrontare secondo un approccio multivariato il problema.

In tabella 1 vengono riportate le caratteristiche delle UCU più diffuse nel bacino, aventi una frequenza pari almeno a 500 celle (0.8 km²). La tabella mostra come le UCU più diffuse siano caratterizzate tutte, da litologie argillose e quindi a comportamento pseudo-coerente, quasi completamente ricadenti nella classe di pendenza con valori da 10° ai 20°.

VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ DA FRANA

In accordo con l'approccio utilizzato, il valore di suscettibilità da frana associato a ciascuna area, in funzione delle sue caratteristiche fisico-ambientali, è stato ricavato mettendo in relazioni spaziali gli strati informativi dei fattori combinati e delle frane. Intersecando i due layer (UCU e frane), è infatti possibile calcolare la densità di area in frana ^{sld}, come rapporto tra l'estensione dell'area in frana ^{sld}A e quella dell'area totale A, di ciascuna *i*-esima UCU:

$$\text{sld}_{UCU_i} = \text{sld}A_{UCU_i} / A_{UCU_i}$$

Dal punto di vista probabilistico, si dimostra come la densità di frana corrisponda al valore della probabilità di riscontrare un'area in frana, condizionata ad una determinata combinazione di fattori di controllo. La funzione ^{sld} = *f*(UCU) costituisce dunque la funzione probabilistica scelta per rappresentare le condizioni di suscettibilità da frana.

Per validare il modello di suscettibilità è possibile seguire un approccio largamente utilizzato in letteratura (CHUNG & FABBRI, 2003; IRIGARAY *et alii*, 2007; CONOSCENTI *et al.*, 2008a, 2008b); questo prevede, in generale, l'analisi della coerenza tra lo scenario di franosità previsto (*prediction image*), il quale costituisce la proiezione nello spazio del modello, e quello costituito dalla distribuzione delle frane incognite (*unknown target pattern*). I vari metodi di validazione si differenziano per le modalità con le quali vengono introdotte e/o simulate le immagini, prevista e reale, della distribuzione delle frane. È infatti possibile

Tab. 1
Le combinazioni delle Ucus più diffuse

| VALUE | N° Celle (Bacino) | CUR (rad/m) | TWI | SLO (*) | LIT |
|-------|-------------------|-------------|----------|---------|----------------|
| 99 | 2259 | 0.8-3.5 | 6.3-6.7 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |
| 121 | 2097 | 0.8-3.5 | 6.3-6.7 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |
| 115 | 2074 | 0.3-0.8 | 6.3-6.7 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |
| 86 | 2182 | -1-0.01 | 6.7-7.4 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |
| 119 | 1664 | 0.8-3.5 | 6.3-6.73 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |
| 97 | 1313 | 0.8-3.5 | 6.7-7.4 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |
| 91 | 1464 | 0.01-0.03 | 6.3-6.7 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |
| 110 | 1697 | -1-0.01 | 6.7-7.4 | 5-10 | PSEUDOCOERENTE |
| 123 | 1729 | -0.1-0.01 | 6.3-6.7 | 5-10 | PSEUDOCOERENTE |
| 116 | 951 | -1-0.01 | 6.7-6.7 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |
| 106 | 951 | -1-0.01 | 6.3-6.7 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |
| 105 | 678 | 0.8-3.5 | 6.3-6.7 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |
| 180 | 532 | 0.8-3.5 | 6.7-7.4 | 10-20 | PSEUDOCOERENTE |

procedere secondo l'approccio più direttamente legato all'aspetto previsionale, solo quando siano disponibili archivi temporali dei dissesti; questi ultimi, infatti, consentono di utilizzare un set di frane, rilevate in una data epoca, per costruire il modello (calcolando le densità di frana corrispondenti a ciascuna UCU), e di confrontare l'immagine previsionale prodotta, con la distribuzione spaziale delle frane ad un epoca differente. Una condizione assai diffusa è invece rappresentata dalla mancanza di un archivio delle frane che sia definito almeno per due epoche differenti. CHUNG & FABBRI (2003) individuano in questo caso due possibili tecniche: una suddivisione random dell'archivio delle frane in due archivi separati, ciascuno dei quali simuli un'epoca differente (*random partition*): si tratta di un espediente che consente di ottenere un set di "eventi training", con i quali si costruisce il modello, ed un set di "eventi test", la cui

distribuzione spaziale ci si propone di riprodurre. Alternativo a questo metodo è quello invece basato sulla suddivisione dell'area indagata in due settori (*spatial partition*), utilizzando assi di simmetria eventualmente riconosciuti (limiti che separino, all'interno dell'area indagata, due settori aventi caratteristici simili): in questo caso il modello costruito in un "settore training", è esportato in un "settore test", in modo da poter confrontare, in quest'ultimo, l'immagine previsionale prodotta con la distribuzione delle frane osservate.

CONOSCENTI *et al.* (2008b) propongono una strategia di validazione che opera invece una suddivisione random delle celle di ciascuna delle UCU (*spatial random partition*), in un gruppo *training* ed uno *test*, numericamente bilanciati. Questo approccio garantisce un perfetto bilanciamento tra il numero di celle presenti nell'area training e nell'area test, per ciascun valore di UCU, consentendo di lavorare secondo una partizione spaziale oggettiva (in quanto random) e perfettamente simmetrica dal punto di vista geostatistico, che produce due sub-aree realmente gemelle. Le partizioni basate su suddivisione random delle frane o su individuazione di assi di simmetria geologica dell'area, sono invece fortemente esposte a variazioni spaziali dei fattori di controllo (sia che siano inclusi nel modello, sia che siano ignorati), che potrebbero limitare la capacità previsionale del *dominio training* nei confronti del *dominio test*.

A ciascuna UCU viene dunque assegnato un valore di suscettibilità da frana in funzione della densità di area in frana riscontrata nelle celle *training* (densità *training*). Tracciando in un grafico a dispersione la porzione cumulata di celle *training* in frana, in funzione della porzione cumulata delle celle *training* totali, ordinate secondo densità *training* decrescenti, è possibile valutare la qualità dell'adattamento del modello (*model fit*), in funzione delle caratteristiche geometriche della curva che si ottiene: la *success rate curve*. Analogamente, dalla *prediction rate curve*, che si ottiene tracciando la porzione cumulata di celle *test* in frana, in funzione della porzione cumulata delle celle *test* totali, fermo restando il criterio ordinario desunto dalla densità *training*, è possibile valutare la abilità previsionale del modello (*prediction skill*). Se, nel *dominio test*, la suscettibilità delle UCU è correttamente classificata (dunque, se il modello definito nel *dominio training* è effettivamente corretto), allora, tenendo conto della rappresentazione in forma cumulata, le curve di validazione mostreranno in generale forti gradienti nel tratto iniziale (la percentuale di area in frana prevista sarà maggiore per le classi a suscettibilità maggiore) e un andamento linearmente decrescente, via via che si prendono in considerazione le risposte delle UCU meno suscettibili. Un andamento secondo una retta a 45° indicherebbe in questo grafico che la porzione di area in frana è costante per ciascuna area analizzata, senza che la scala di suscettibilità secondo la quale le UCU vengono disposte lungo l'asse delle

ascisse, ne moduli minimamente l'andamento: questo andamento costituisce dunque il limite prestazionale inferiore dei modelli previsionali, corrispondente ad una previsione completamente random. Allo stesso tempo, il confronto tra l'andamento delle due curve di validazione (*success* e *prediction*) costituisce un importante criterio della qualità della validazione stessa. Infatti, se è possibile che due domini, quale che sia la procedura utilizzata per generarli, producano per caso *success rate curve* con andamenti che rispondono ai requisiti di sopra esposti, soltanto quando il modello previsionale è correttamente strutturato (i fattori di controllo selezionati sono sufficienti a descrivere il fenomeno) e la suscettibilità delle UCU è correttamente definita (l'archivio frane è completo e correttamente rappresentato) la *prediction rate curve* sarà simile (in un modello perfetto, coincidente). Un ulteriore criterio nella valutazione della prestazione previsionale del modello è dunque il grado di coincidenza delle curve di validazione: ogni scostamento corrisponde infatti ad una sovra- o sotto-stima della suscettibilità delle UCU corrispondenti lungo l'asse delle ascisse.

RISULTATI E VALIDAZIONE DEI MODELLI

Al fine di calcolare il valore di densità di frana per ciascuna delle combinazioni rappresentate dal layer delle UCU, è stata realizzata l'intersezione di quest'ultimo con il layer vettoriale delle frane del 2006. In questo modo a ciascuna delle combinazioni ottenute è stato associato un valore di suscettibilità da frana atteso, il quale corrisponde alla probabilità spaziale di incontrare una frana, condizionata alla circostanza di "interrogare" celle appartenenti ad una determinata UCU. In Fig. 5 vengono mostrate le carte della suscettibilità da frana ottenuta per le due tipologie di movimento, nella quale i valori di densità sono stati riclassificati secondo il criterio delle aree uguali, in modo che ciascuna delle classi risulti "sostenuta" da un ugual numero di osservazioni (numero di celle). La carta mostra naturalmente valori di suscettibilità indipendenti dalla sovrapposizione di frane, dal momento che il valore di densità di frana di una UCU viene associato a tutte le celle che la rappresentano.

Per sottoporre a validazione il modello di suscettibilità ottenuto, la cui proiezione spaziale (geografica) costituisce le carte di Fig. 5, si è proceduto alla partizione spaziale random del layer delle UCU (CONOSCENTI *et al.*, 2008^{NARO}), generando due grid perfettamente gemelli, che vengono chiamati UCU^{TRN} (training) e UCU^{TST} (test). Intersecando il grid UCU^{TRN} con il layer delle frane, si ricalcolano, per ciascuna delle UCU, dei valori di densità di frana dipendenti dalle sole celle in frana, ricadenti all'interno delle celle

training. Questi valori vengono allora trasferiti alle corrispondenti celle del layer UCU^{TST} (appartenenti alla stessa UCU), definendone la densità di frana attesa, la cui distribuzione spaziale fornisce l'immagine previsionale (*prediction image*) del *dominio test*. Questa può dunque essere confrontata con la distribuzione reale delle frane (*unknown target pattern*), costituita dalle celle in frana appartenenti al solo *dominio test*.

In Figg. 6a e 6b vengono mostrati i grafici di validazione ricavati per il bacino del T.te Tumarrano, i quali mettono in evidenza un andamento di entrambe le curve di validazione largamente soddisfacente, con gradiente molto elevato in corrispondenza delle classi più suscettibili e linearmente decrescente fino alle UCU meno suscettibili. Il grado di sovrapposizione tra *success* e *prediction rate curves* è molto elevato, per le frane di colamento, e meno marcato nel caso degli scorrimenti rotazionali.

Sfruttando la disponibilità, per l'area rappresentativa, di un archivio delle frane definito anche al 2007, al fine di verificare la stabilità del modello

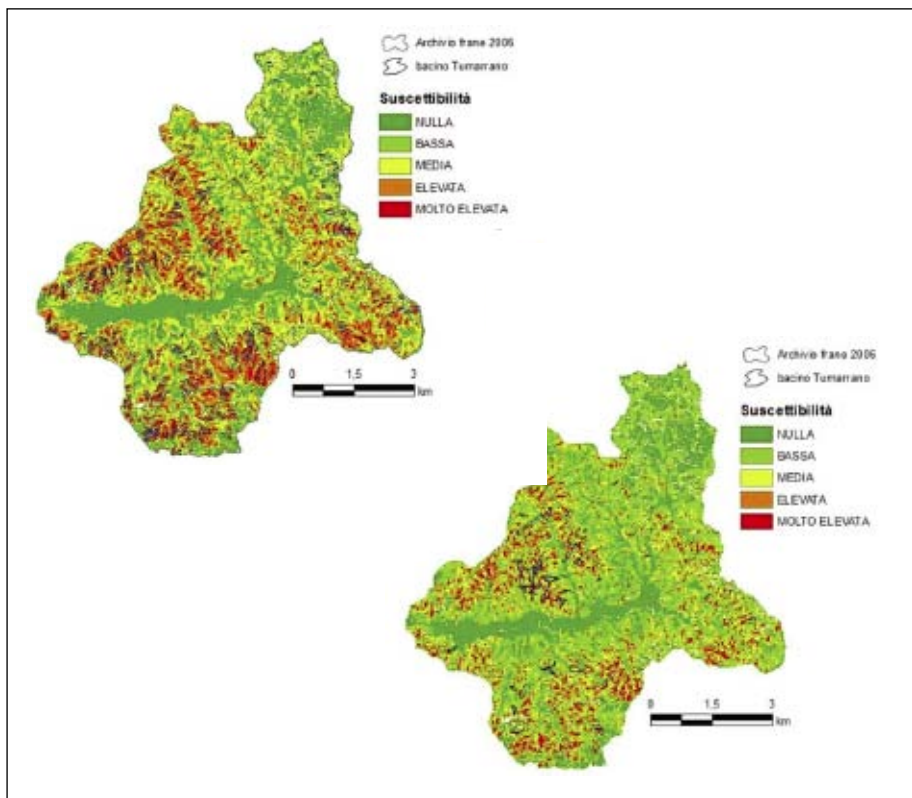


Fig. 5 — a) Carta della suscettibilità da FLW (5a) e da RSL (5b), derivata dall'intero archivio frane.

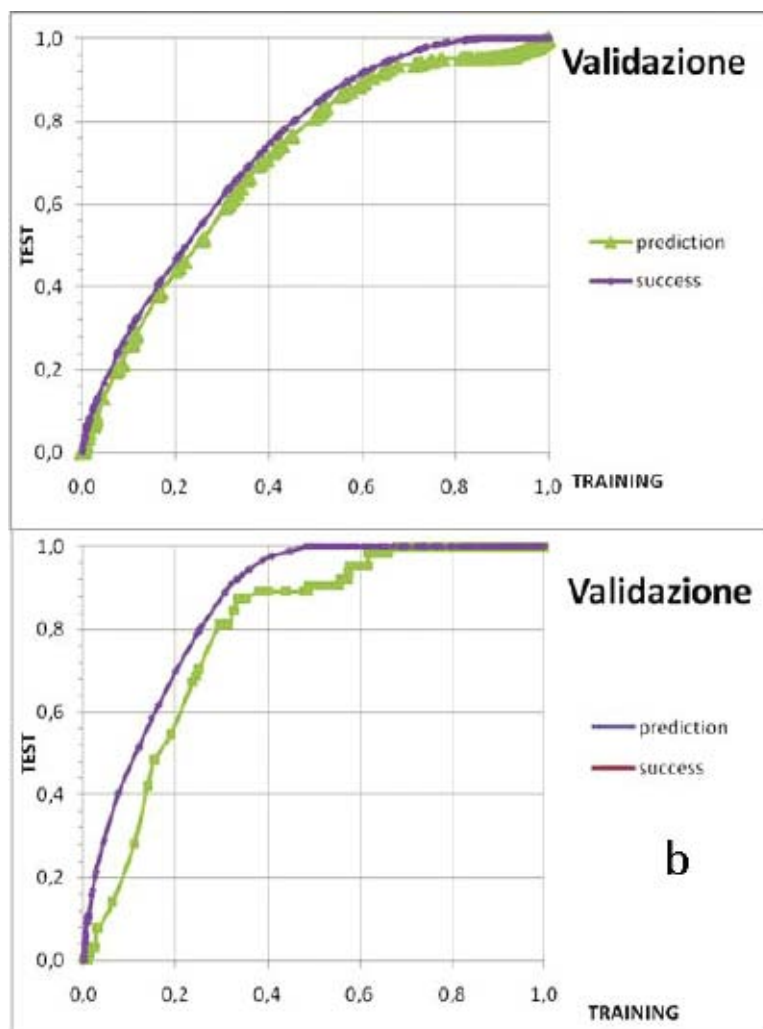


Fig. 6 — a, b. Curve di validazione per FLW e RSL.

rispetto ad una migrazione temporale, pur limitata ad una sola stagione idrologica, il modello di suscettibilità è stato sottoposto ad una validazione temporale. Il layer delle UCU è stato dunque ritagliato utilizzando i limiti dei sottobacini campione, assegnando a ciascuna combinazione il valore di suscettibilità da frana osservato sull'intero bacino, ricavato dalle frane 2006 (Fig. 5). In Fig. 7 vengono mostrate le carte della suscettibilità ottenute per importazione dentro l'area campione del modello totale, con la sovrapposizione delle frane 2007. Tutte le UCU individuate all'interno del bacino del

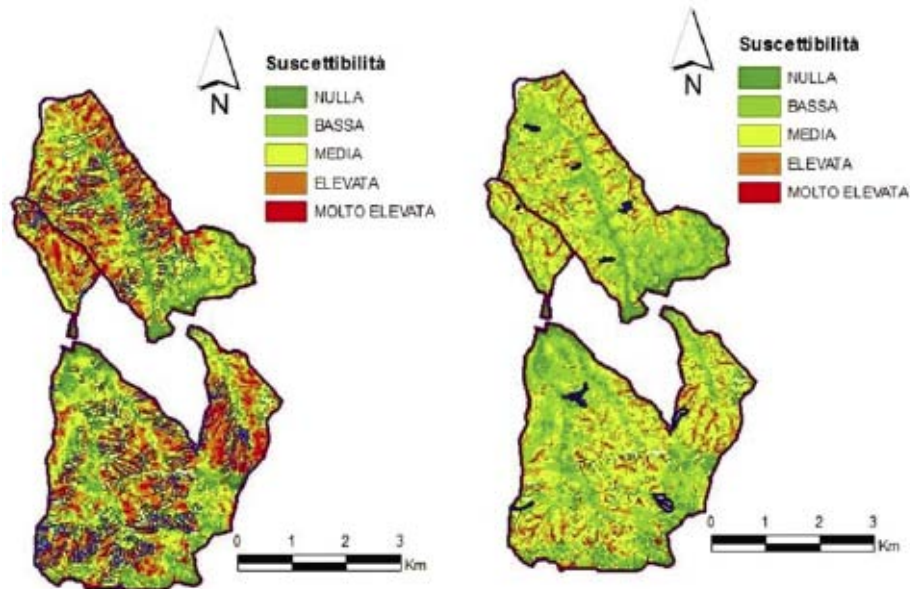


Fig. 7 — a. Carta della suscettibilità da FLW importata dentro l'area campione con sovrapposizione delle frane 2007.

T.te Tumarrano sono presenti anche all'interno dell'area di verifica, pur con frequenze (numero di celle) in alcuni casi estremamente limitate.

In Figg. 8a e 8b vengono mostrate le curve di validazione ottenute, le quali confermano la buona capacità previsionale del modello per i colamenti, anche quando questo viene sottoposto a migrazione temporale: dalle curve di validazione è possibile osservare come il 50% dell'area prevista come più suscettibile giustifica il 25% delle frane incognite. Sebbene non si sia proceduto ad una riclassificazione delle classi di suscettibilità, sulle curve di validazione sono presenti pochi effetti ad alta frequenza, per lo più riconducibili a singole UCU che hanno "lavorato" diversamente nei domini *training* e nel *test*. Le curve di validazione del modello per gli scorrimenti rotazionali rendono evidente un'incapacità del modello importato, allenato sulle frane 2006 al di fuori dell'area campione, di riprodurre le frane 2007.

Nelle Figg. 9a e 9b vengono mostrate le curve di validazione ottenute per auto validazione di un modello costruito esclusivamente all'interno dell'area campione. Quest'ultimo, dovrebbe fornire una prestazione previsionale ottimale, in quanto priva di effetti legati ad UCU presenti all'esterno di questa. Il confronto delle curve di validazione ottenute in questo caso, mette in evidenza una pressoché equivalente prestazione previsionale, per il modello delle

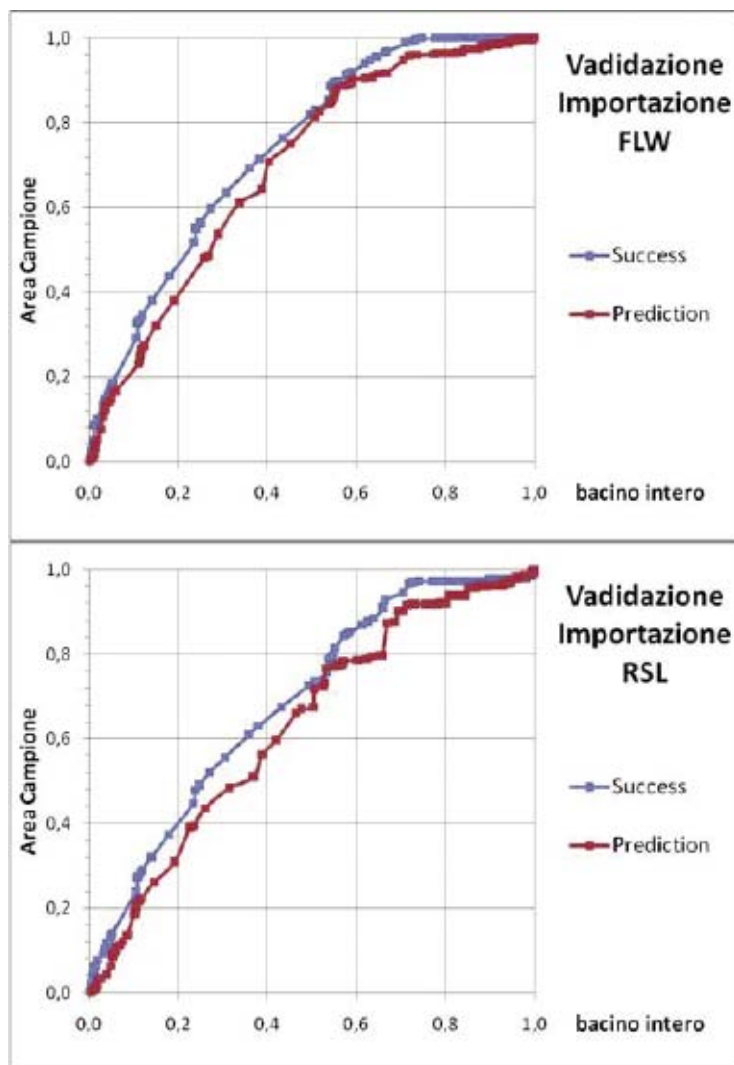


Fig. 8 — Validazione del modello di importazione a) FLW;b) RSL

frane di colamento, mentre una prestazione nettamente migliore si riscontra per le frane di scorrimento rotazionale.

Il modello di suscettibilità e la carta derivata (Fig. 5) costituiscono dunque una rappresentazione delle condizioni di suscettibilità dell'area studiata, che soddisfa i requisiti di stabilità temporale e spaziale delle distribuzioni di frana attese.

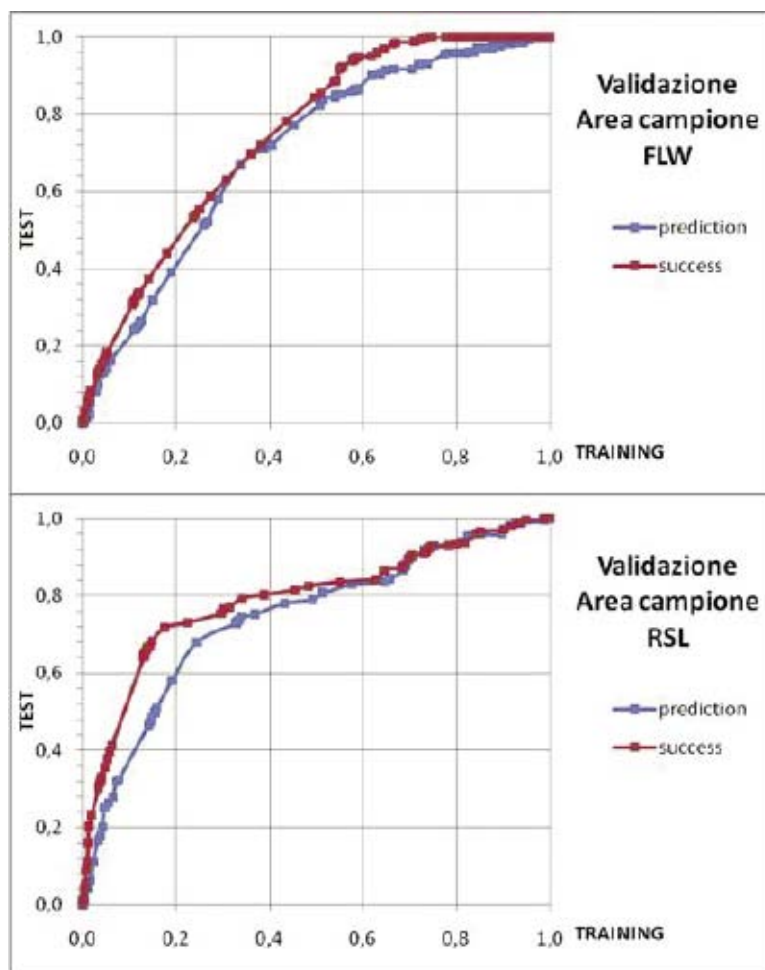


Fig. 9 — Auto-Validazione del modello a) FLW;b) RSL.

DISCUSSIONE E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La ricerca condotta ha rilevato una buona capacità previsionale per un modello basato su un numero ridotto di parametri, combinati in Unità di Condizioni Uniche, che è stata verificata attraverso una validazione sia spaziale, per tutto il bacino, che, per una sua parte rappresentativa, temporale.

Le curve di validazione prodotte dal modello di suscettibilità relativo all'intero bacino, attestano una buona capacità previsionale e stabilità del modello. La minore qualità delle curve di validazione per le frane di scorri-

mento rotazionale potrebbe essere legata ad una minore capacità di spiegare questa tipologia di frana, da parte dei fattori di controllo selezionati, oppure per una ambiguità delle forme utilizzate per rappresentare gli eventi pregressi. Infatti, è vero che per quanto riguarda le frane di colamento, l'intera area in frana presenta una buona omogeneità e specificità, mentre le aree coinvolte in scorrimenti rotazionali, più facilmente presentano forti variabilità, soprattutto nelle caratteristiche topografiche, delle aree ricadenti all'interno della cosiddetta area in frana, la quale include sia la zona di distacco che quella di accumulo.

Per quanto riguarda la validazione temporale delle frane, questa fornisce risultati molto più soddisfacenti per le frane di colamento, dal momento che le due epoche di rilevamento si discostano per un solo anno; questo intervallo è, infatti sufficiente per questa tipologia di movimento a riprodurre in modo completo uno scenario di attivazioni simile a quello con il quale è stata prodotta la carta di suscettibilità.

La procedura utilizzata sembra comunque costituire un metodo robusto per la valutazione della suscettibilità da frana. Il largo e diffuso utilizzo che i metodi geostatistici conoscono già da almeno tre decenni negli studi della pericolosità da frana, non elimina tuttavia alcuni nodi concettuali ed operativi che ne rendono a tutt'oggi solo sporadica l'applicazione da parte delle amministrazioni che in Italia studiano il rischio da frana.

Lo studio condotto nel bacino del Torrente Tumarrano vuole costituire un contributo nell'ambito delle ricerche finalizzate allo sviluppo di metodi di valutazione delle condizioni di pericolosità da frana, applicabili alla scala regionale. In questo senso, un forte moltiplicatore di costi è la necessità di ricostruire archivi dei dissesti con buon grado di risoluzione e per più epoche di osservazione, su aree aventi estensioni dell'ordine delle migliaia di chilometri quadrati. Nel presente lavoro, si è verificata la possibilità di procedere ad un rilevamento delle frane, utilizzando il sistema Google EarthTM, i cui risultati sono stati, per controllo, confrontati con quelli prodotti dal rilevamento di campagna; questo confronto ha evidenziato differenze del tutto trascurabili e, soprattutto, che non attestano univocamente una migliore qualità dei dati di terreno (i quali soffrono di un punto di vista spesso troppo ravvicinato).

L'utilizzo del sistema Google EarthTM può dunque costituire un elemento di fondamentale importanza per lo sviluppo futuro dei metodi di valutazione della pericolosità da frana: sia per la velocità di rilevamento, il quale risulta al tempo stesso agile e dettagliato, sia per la possibilità di accedere in modo immediato e con sovrapposizione spaziale delle foto-immagini controllata, a coperture multitemporali. Quest'ultimo passo apre la possibilità di procedere a validazioni temporali dei modelli ed all'analisi dei tempi di ritorno degli eventi di attivazione, ponendo le basi per valutare la pericolosità piuttosto che la suscettibilità da frana.

BIBLIOGRAFIA

- BRABB E.E., 1984 — Innovative approaches to landslide hazard mapping. — *Proc. 4th Intern. Symp. on Landslides*, Toronto, 1: 307-324.
- CARRARA A., CARDINALI M., GUZZETTI F. & REICHENBACH P., 1995 — *GIS technology in mapping landslide hazard*. Pp. 135-175 in: Carrara A. & Guzzetti F. (eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. — *Kluwer Academic Publisher*, Dordrecht, Netherlands.
- CHUNG C. & FABBRI F., 1995 — Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. Pp. 107-142 in: Carrara A. & Guzzetti F. (eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. — *Kluwer Academic Publisher*, Dordrecht, Netherlands.
- CHUNG C. F. & FABBRI A., 2003. — Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. — *Natural Hazards*, 30: 451-472.
- CLERICI A., PEREGO S., TELLINI C. & VESCOVI P., 2002 — A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. — *Geomorphology*, 48: 349-364.
- CONOSCENTI C., DI MAGGIO C. & ROTIGLIANO E., 2008a — Gis analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy). — *Geomorphology*, 94: 325-339.
- CONOSCENTI C., DI MAGGIO C. & ROTIGLIANO E., 2008b — Soil erosion susceptibility assessment and validation using a geostatistical multivariate approach: a test in southern Sicily. — *Natural Hazards*, 46: 287-305.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J., 1996 — Landslides Types and Processes. Pp. 36-75 in: Turner A.K. & Schuster R.L. (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. — *National Academy Press*, WA.
- FABBRI A.G. & CHUNG C.J., 2003 — Is prediction of future landslides possible with a GIS? In: Chacon J., Corominas J. (eds.), *Special issue on Landslides and GIS*. *Natural Hazards*, 30 (3): 487-499.
- FELL R., COROMINAS J., BONNARD C., CASCINI L., ERIC L. & SAVAGE W.Z., 2008 — Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning (on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes). — *Engineering Geology*, 102: 85-98.
- GUZZETTI F., CARRARA A., CARDINALI M. & REICHENBACH P., 1999 — Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. — *Geomorphology*, 31: 181-216.
- IRIGARAY C., FERNÁNDEZ T., EL HAMDOUNI R. & CHACÓN J., 2007 — Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). — *Natural Hazards*, 41: 61-79.
- OHLMACHER G., 2007 — Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. — *Engineering Geology*, 91: 117-134.
- VAN DEN EECKHAUT M., REICHENBACH P., GUZZETTI F., ROSSI M. & POESEN J., 2009 — Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium. — *Natural Hazards and Earth System Science*, 9: 507-521.
- VARNES, D.J. & IAEG (Commission on Landslides and other Mass-Movements), 1984 — *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. — *The UNESCO Press*, Paris, 63 p.
- WILSON J.P. & GALLANT J.C., 2000 — *Terrain analysis: principles and applications*. — *Wiley & Sons Inc.*, Canada.

Indirizzo degli autori — D. COSTANZO, C. CONOSCENTI, E. ROTIGLIANO, V. AGNESI, Università degli Studi Di Palermo, Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Via Archirafi, 20 - 90123 Palermo (I); e-mail: dario.costanzo@unipa.it