

UN APPROCCIO PER CONIUGARE LA SUSCETTIVITÀ SPAZIALE E TEMPORALE DA FRANA: UN'APPLICAZIONE NELLA REGIONE MARCHE (ITALIA CENTRALE)

AN APPROACH TO JOIN THE SPATIAL AND TEMPORAL COMPONENTS OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY: AN APPLICATION TO THE MARCHE REGION (CENTRAL ITALY)

ROBERTO W. ROMEO^(*), MILENA MARI^(*), MARIO FLORIS^(**), GIULIO PAPPAFICO^(*) & UMBERTO GORI^(*)

^(*) University of Urbino - DiGeoTeCA - Campus Scientifico, 61029 Urbino, Italy - Email: rwromeo@uniurb.it

^(**) University of Padua - Department of Geosciences - Padova, Italy

RIASSUNTO

Il lavoro di seguito esposto riguarda lo studio della propensione al dissesto, definita attraverso la combinazione dei fattori naturali ed antropici che portano ad una suscettività da frana più elevata, e dell'attività (frequenza) dei movimenti gravitativi in una determinata area. La componente spaziale della suscettività da frana è stata analizzata considerando quattro fattori predisponenti, selezionati valutando la disponibilità di banche dati di carattere generale, solitamente disponibili a scala areale: i fattori considerati sono litologia, esposizione dei versanti, acclività dei versanti e uso del suolo, che, rispettivamente, sono rappresentativi delle proprietà meccaniche, dell'assetto morfologico, delle condizioni climatiche locali e dell'attività antropica. La componente temporale della suscettività da frana è stata definita mediante l'analisi multitemporale di foto aeree, estesa ad un intervallo temporale rappresentativo del ciclo climatico che interessa ricorsivamente un bacino (comunemente considerato pari a 30-50 anni). Le due componenti sono state successivamente combinate insieme per giungere alla stima della suscettività da frana globale.

TERMINI CHIAVE: *frana, suscettività, indice di pericolosità, GIS, Italia centrale*

INTRODUZIONE

I fenomeni di instabilità dei versanti si verificano a diverse scale di grandezza, in diversi contesti geologici e morfologici e in differenti condizioni climatiche. La valutazione del rischio da frana è in genere un processo logico che coinvolge tre stadi di studio: suscettività, pericolosità e rischio s.s. (EINSTEIN, 1988), che fondamentalmente sono rispettivamente la risposta agli interrogativi dove, quando e quanto forti (inteso come quanto dannosi) si verificheranno frane. In ogni caso, la suscettività definisce il grado di predisposizione di un territorio a franare, con la conseguenza che molte Amministrazioni locali utilizzano mappe della suscettività da frana come base per la pianificazione territoriale. Perciò, una stima (anche se implicita) della frequenza di occorrenza delle frane è comunque auspicabile nella valutazione della suscettività da frana. Questa non rappresenta la pericolosità da frana in senso stretto, dato che formalmente la pericolosità richiede la valutazione di una frequenza di superamento di una specifica severità di frana (NATOLI *et alii*, 1994), ma una stima della predisposizione dei versanti a franare in un determinato

ABSTRACT

The paper is focused on the assessment of the landslide susceptibility, defined as the combination of the natural and human factors that make slopes prone to slide, coupled with the observed recurrence of landslide reactivations. The susceptibility (i.e., the spatial component of the landslide hazard) is assessed by taking into account four causative factors chosen looking at the availability of general-purpose datasets commonly available at area-scale: they are lithology, slope aspect, slope gradient and land use, which are representative of the mechanical properties, morphological features, local climatic conditions and human activities, respectively. The temporal component of the landslide susceptibility is assessed through a multitemporal analysis of aerial photographs, spanning a time interval representative of the climate cycles which recursively affect a basin area (typically, 30 to 50 years long). The two components are then joined to provide an overall estimate of the landslide susceptibility in terms of a landslide hazard index.

KEY WORDS: *landslide, susceptibility, hazard index, GIS, central Italy*

INTRODUCTION

Slopes instabilities occur at different scales, in different geological and morphological environments and under different climatic conditions. Their assessment is a logical process that involves three separate but dependant steps: susceptibility, hazard and risk (EINSTEIN, 1988), which ultimately provide answers to the questions where, when and how strong (in the sense of how damaging) landslides occur, respectively. Anyway, the susceptibility is aimed to provide the overall slopes proneness to undergo failure, with the result that many local governments use landslide susceptibility maps for the land use planning, without any regard to their temporal occurrence. Therefore, an estimate, even though implicit, of how often landslides occur is yet desirable in the assessment of the landslide susceptibility. This isn't a hazard estimate strictly speaking, since formally hazard requires the assessment of a frequency of exceedance of a given landslide severity (NATOLI *et alii*, 1994), but an estimate of the proneness of slopes to slide within a timeframe. Therefore, when the word 'hazard' is used

intervallo di tempo. In questo senso la parola “pericolosità” (abbrev. di “indice di pericolosità”) viene usata per intendere l'unione della suscettività spaziale e temporale da frana, al fine di evitare la confusione derivante dall'uso di molteplici aggettivi della suscettività la quale, convenzionalmente, si riferisce alla sola componente spaziale.

I metodi applicati ai fini dell'analisi della suscettività da frana sono generalmente distinti in approcci qualitativi e quantitativi (ALEOTTI & CHOWDHURY, 1999; GUZZETTI *et alii*, 1999). I primi sono generalmente basati su tecniche tradizionali, come rilevamento di campagna, analisi geomorfologica e analisi delle foto aeree (CARRARA & MERENDA, 1976; FENTI *et alii*, 1979; KIENHOLZ, 1978; RUPKE *et alii*, 1988, REICHENBACH *et alii*, 2005), supportati anche da tecniche GIS (CARRARA *et alii*, 1991) per produrre carte tematiche (STEVENSON, 1977). I secondi possono essere distinti in due categorie: i metodi statistici ed i metodi deterministici. Mentre gli approcci statistici si prestano bene per studi a carattere regionale, i metodi deterministici risultano più efficaci per studi puntuali, a scala locale (GOKCEOGLU & AKSOY, 1996) e questo ha fatto sì che gli approcci statistici abbiano raggiunto nel passato recente una maggiore diffusione ed utilizzo, spaziando da analisi univariate (KINGSBURY *et alii*, 1992; LEE & MIN, 2001) to multi-variate analyses (CARRARA, 1983; CARRARA *et alii*, 1991; GORSEVSKI *et alii*, 2000; LEE *et alii*, 2002; SANTACANA *et alii*, 2003; CHEN & WANG, 2007).

Nel presente lavoro viene illustrato un approccio per valutare la predisposizione dei versanti a franare che include anche informazioni derivate dall'osservazione della frequenza di occorrenza delle frane. Questo lavoro segue, anche se concettualmente precede, un'altra pubblicazione in cui gli autori hanno affrontato il problema della stima della pericolosità e del rischio da frana (ROMEO *et alii*, 2006).

METODOLOGIA

La suscettività da frana deriva dalla somma di vari fattori predisponenti che minacciano la stabilità dei pendii ed è evidente che la conoscenza delle loro interazioni può fornire importanti informazioni sulla possibile ubicazione di future frane, consentendo così una pianificazione razionale ed uno sviluppo del territorio. A questo scopo, è stato condotto uno studio su una zona campione (Fig. 1) collocata nel settore settentrionale della Regione Marche (Italia centrale). La suscettività è stata divisa in due componenti, una relativa alla valutazione della componente spaziale e la seconda relativa alla valutazione della componente temporale, che alla fine convergono nella valutazione della suscettività da frana complessiva (Fig. 2).

La componente spaziale è valutata attraverso la somma pesata di fattori predisponenti, mentre la componente temporale è valutata mediante l'analisi multitemporale di fotografie aeree e mediante la successiva definizione dei tempi di ritorno medi delle riattivazioni delle frane. Entrambe le componenti sono state indicizzate in una scala convenzionale che va da 0 (influenza minore) a 100 (massima influenza), per fare sì che possano essere combinate in modo omogeneo.

La scelta dei fattori predisponenti è subordinata al soddisfacimento del requisito essenziale di coprire l'intera area, in quanto dati discon-

in this paper it refers strictly to the probability of a landslide reactivation, otherwise, when referring to the joining between the spatial and temporal components of the landslide susceptibility, it is more consistently termed as “hazard index”.

The landslide susceptibility methods are usually divided in qualitative and quantitative approaches (ALEOTTI & CHOWDHURY, 1999; GUZZETTI *et alii*, 1999). The former are based on traditional methods, such as field surveys, geomorphic analyses and aerial photographs interpretation (CARRARA & MERENDA, 1976; FENTI *et alii*, 1979; KIENHOLZ, 1978; RUPKE *et alii*, 1988, REICHENBACH *et alii*, 2005), supported by GIS techniques (CARRARA *et alii*, 1991) to produce thematic maps (STEVENSON, 1977). The latter may be divided in two categories: statistical and deterministic methods. While statistical methods work well for regional studies, deterministic methods are more efficient for detailed studies on a local scale (GOKCEOGLU & AKSOY, 1996), and that's why statistical methods have recently reached a great popularity, with approaches ranging from univariate analyses (KINGSBURY *et alii*, 1992; LEE & MIN, 2001) to multi-variate analyses (CARRARA, 1983; CARRARA *et alii*, 1991; GORSEVSKI *et alii*, 2000; LEE *et alii*, 2002; SANTACANA *et alii*, 2003; CHEN & WANG, 2007).

The paper shows an approach for the landslide susceptibility assessment which incorporates also the frequency of landslides reactivation; it follows, even if conceptually precedes, another work where the authors faced the problem of estimating the overall landslide hazard and risk (ROMEO *et alii*, 2006).

METHODOLOGY

The landslide susceptibility is a mix of prone-factors affecting the stability of slopes whose provides useful information about the possible location of future landslides, thus allowing for a rational land-use planning and development. At this purpose, a study was carried out in a training area (Fig. 1) located in the Northern sector of the Marche Region (central Italy). The susceptibility has been split into two components, the spatial and temporal ones, which finally converge for the assessment of the landslide susceptibility as a whole which has been termed as hazard index (Fig. 2).

The spatial component is assessed through a weighed summation of causative factors, while the temporal component is assessed via a multitemporal analysis of landslide reactivations carried out by an aerial photographs survey. Both the components are indexed in a conventional scale ranging from 0 (least influence) to 100 (most influence), so that they can be coupled homogeneously.

The choice of the causative factors is subjected to the fulfilment of the fundamental requisite to cover the entire area, since discontinuous data would compromise the analyses leading to biases or misinterpretations of the correlations between each factor and the investigated phenomena.

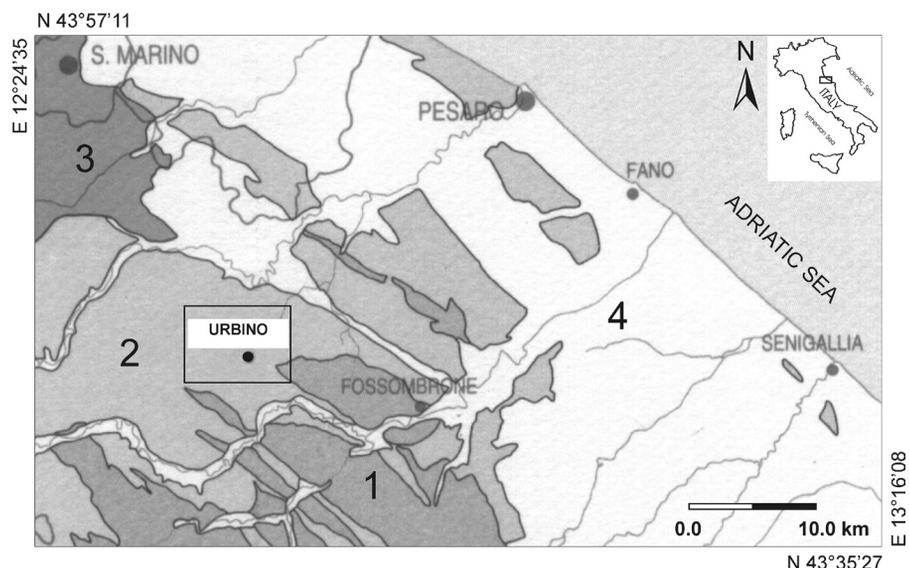
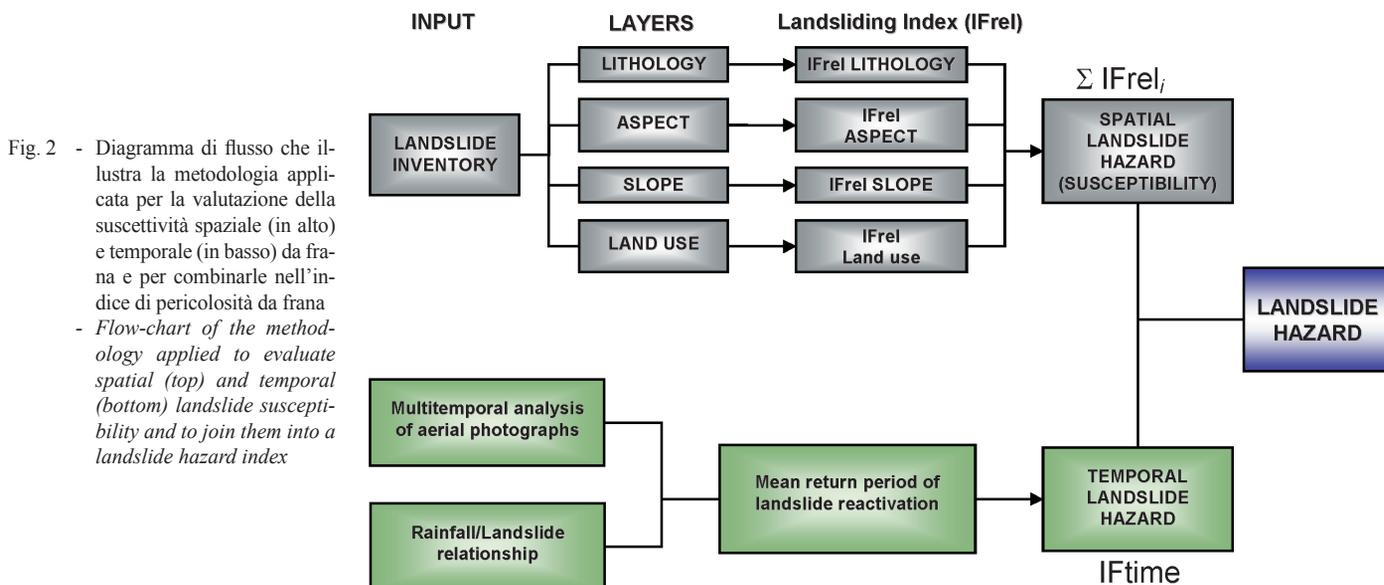


Fig. 1 - Schema geologico del settore settentrionale della Regione Marche ed ubicazione dell'area di studio (rettangolo etichettato come Urbino). Leggenda delle unità geologiche: 1) Calcari, calcari marnosi, marne e selci (dal Calcare Massiccio alla Formazione dello Schlier, in successione discontinua dal Lias al Miocene), 2) Arenarie, peliti ed evaporiti (dalla Formazione Marnoso-Arenacea alla Formazione a Colombacci, Miocene), 3) Complesso delle argille caotiche della Valle del Marecchia (da Cretaceo inferiore a Eocene), 4) Depositi argillosi, sabbiosi e ghiaiosi (Plio-Pleistocene). (adattato da ANTONINI *et alii*, 1993)
- Geological sketch of the northern sector of the Marche Region and location of the sample study-area (rectangle labelled as Urbino). Legend of the geological units: 1) Limestones, marly limestones, marlstones and cherts (Calcare Massiccio to Schlier formations, spanning discontinuously from Lias to Miocene); 2) Sandstones, pelites and evaporites (Marnoso-Arenacea to Colombacci formations, Miocene); 3) Chaotic complex clays of the Marecchia Valley (Lower Cretaceous to Eocene); 4) Clayey, sandy and gravelly deposits (Plio-Pleistocene). (adapted from ANTONINI *et alii*, 1993)



tinui comprometterebbero l'analisi portando a distorsioni o interpretazioni errate delle correlazioni tra ciascun fattore ed i fenomeni indagati.

In Italia, ogni Amministrazione locale possiede diverse banche dati territoriali, a scale diverse e per scopi diversi (Tab. 1). Tra queste solo tre banche dati, che fanno riferimento a progetti nazionali co-

In Italy, each local government has different territorial databases, at different scales and for different purposes (Tab. 1). Among them only three databases, referring to codified national projects, have been realized with homogeneous standards: the digital terrain model, the geological map and the land use map. Despite their intrinsic limi-

Description	Source	Format	Information
<i>CTR</i> – TECHNICAL REGIONAL MAP Topographic map, scale 1:10.000	Marche Regional Government	files .DWG	DTM, layer ASPECT, layer SLOPE
<i>CARG</i> PROJECT Geological map, scale 1:10.000	Marche Regional Government	files .PDF	layer LITHOFACIES
<i>CUS</i> – LAND COVER MAP Regional land cover map, scale 1:10.000	Marche Regional Government	files .DXF	layer LAND USE
<i>PAI</i> – LANDSLIDES and FLOODS MAP Regional Plan finalized to risk assessment, scale 1:10.000 <i>IFFI</i> PROJECT Italian Landslides Inventory, scale 1:10.000	Marche Regional Government	files .SHP files .DXF	input LANDSLIDE INVENTORY

Tab. 1 - Fonti dei dati, scala, formato dei dati ed informazioni derivate per l'analisi di suscettività
- *Data sources, scales, data formats and derived information for the susceptibility analysis*

dificati, sono state realizzate seguendo criteri omogenei: il modello digitale del terreno, la carta geologica e la carta dell'uso del suolo. Nonostante il loro numero limitato, queste banche dati sono sufficienti per tenere conto di:

- 1) proprietà fisiche dei terreni (litologia, derivata dalla carta geologica);
- 2) caratteristiche morfologiche (pendenza, derivata da DTM) in relazione alle proprietà meccaniche dei terreni (cioè angolo di riposo) e ai processi tettonici (ossia energia del rilievo);
- 3) condizioni climatiche (pendenza ed esposizione, derivate da DTM), intesa come umidità dei terreni (ossia, variazione del contenuto d'acqua a causa dell'esposizione al sole);
- 4) attività antropiche (uso del suolo, derivato dalla carta omonima), che in ultima analisi, rappresentano i fattori fondamentali che influenzano il paesaggio.

Ogni fattore è stato suddiviso in categorie di attributi (dati alfanumerici) o in classi di valori (dati numerici) al fine di descrivere correttamente la sua variabilità. Per quanto riguarda la variabile dipendente (cioè, le frane) è stato scelto un inventario delle frane derivato anche in questo caso da un progetto nazionale (IFFI project, ISPRA 2007) la cui banca dati è disponibile anche su scala regionale (Tab. 1). Pertanto, tutte le banche dati utilizzate in questo studio sono comuni a tutte le Amministrazioni regionali italiane e sono state realizzate con procedure standardizzate e alla stessa scala, consentendo così l'applicazione della presente metodologia su tutto il Paese.

ANALISI DELLA SUSCETTIVITÀ

La correlazione tra fattori predisponenti e frane è stata calcolata secondo l'indice di suscettività da frana (LSI), istituito da LEE & MIN, 2001. LSI è calcolato sommando i valori assegnati, per ciascuna classe o categoria di ogni fattore, attraverso il rapporto tra il numero di celle che corrispondono ad aree in cui si sono verificate frane ed il numero di celle in cui le frane non si sono verificate. Il vantaggio di questo metodo consiste nel fornire una misura immediata del ruolo svolto da ciascun

tations, they are suitable to account for:

- 1) soils' physical properties, related to the lithological features extracted from the geological map;
- 2) morphological features, as inferred from the slope gradient derived from the DTM, and related to the soils' mechanical properties (i.e., angle of repose) and to the tectonic processes (i.e., energy relief);
- 3) climatic conditions, as inferred from the slope aspect (from DTM), such as the soils' humidity (i.e., the change in water content due to sun exposure);
- 4) human activities, as inferred from the land use.

These simple factors, although numerically limited, represent the fundamental causes influencing the landform.

Each factor has been divided into categories of attributes (categorical data) or classes of values (numerical data) which encompass the whole variability of that factor. The dependent variable 'landslide' is derived from a landslides inventory at national scale (IFFI project, ISPRA 2007), whose database is also available at regional scale (Tab. 1). Since we used databases available at national scale, homogeneously compiled, and at the same map scale (1:10,000), the present methodology may be applied all around the country without any exception.

SUSCEPTIBILITY ANALYSIS

The correlation between prone-factors and landslides has been computed according to the landslide susceptibility index (LSI) proposed by LEE & MIN, 2001. The LSI is calculated summing the ratings given by the ratio of the number of cells where landslides occurred to the number of cells where landslides didn't occur for each class or category of a causative factor. The advantage of this method consists in providing an immediate measure of the role played by each factor

fattore e dalle relative classi o categorie sulla distribuzione delle frane. Di fatto, un valore pari all'unità viene interpretato come una condizione di stato-limite, cioè la stessa percentuale di celle consente di determinare la stabilità o l'instabilità. Di conseguenza, valori maggiori di 1 significano propensione a franare, come è vero il contrario per valori inferiori a 1.

Anche il tempo può essere visto come una ulteriore variabile per la determinazione della predisposizione dei versanti a franare. Tutte le frane accertate nell'area in studio sono state esaminate per diversi intervalli di tempo, stabiliti in base alla disponibilità di rilievi fotografici aerei; la frequenza di riattivazione delle frane è data dal numero di riattivazioni nel periodo di tempo coperto dalle fotografie aeree.

La propensione a franare dipende da quanto un determinato fattore pesa nel determinare una situazione di instabilità rispetto agli altri. Allo stesso modo, dato un certo fattore, la suscettività dipende da quanto una classe di valori o una categoria di attributi pesa rispetto alle altre.

Il metodo adottato, anche se semplificato rispetto ad altri approcci simili (ANABALGAN, 1992; CARRARA *et alii*, 1999; ROTH, 1983), assicura una condizione di linearità tra le variabili, che consente l'applicazione del principio di sovrapposizione, una condizione implicitamente assunta in numerosi metodi di suscettività, ma non sempre garantita. Inoltre, poiché il metodo si basa su un insieme di relazioni tra fattori ed effetto (ad esempio, quanto è diffuso ogni fattore nelle aree in frana osservate), esso può essere ascritto alla categoria dei metodi diretti, cioè quelli basati su osservazioni dirette.

L'indice di franosità di una classe o categoria di un certo fattore deriva dal rapporto tra due parametri a e b (LEE & MIN, 2001). Questi sono dati dal numero relativo (o percentuale) di celle, rispettivamente, delle aree in frana e non in frana rispetto al totale relativo. In termini funzionali, sia $N\{F\}$ il numero totale di pixel delle aree in frana e $N\{f_i\}$ il numero dei pixel che ricadono nelle aree in frana per la classe o categoria *i-esima* del fattore in esame. Definiamo il parametro a_i della classe o categoria *i-esima* come il rapporto:

$$a_i = \frac{N\{f_i\}}{N\{F\}}$$

e analogamente, definiamo con b_i il rapporto delle celle delle aree non in frana della classe o categoria *i-esima*, $N\{s_i\}$, rispetto al totale delle celle delle aree non in frana, $N\{S\}$:

$$b_i = \frac{N\{s_i\}}{N\{S\}}$$

Dalle definizioni date discendono le seguenti proprietà:

$[N\{f_i\} + N\{s_i\}] \times 100 \text{ m}^2 = A_i$ (areale di affioramento della classe o categoria *i-esima*)

$[N\{F\} + N\{S\}] \times 100 \text{ m}^2 = A_{\text{tot}}$ (area totale)

$\sum_i a_i = \sum_i b_i = 1$ (or 100%)

Viene quindi definito *indice di franosità* il rapporto:

$$IF_i = \frac{a_i}{b_i}$$

and related classes or categories on the landslides susceptibility. In fact, a rating equal to unity is interpreted as a limit-state condition, that is, the same percentage of cells concurs to determine stability or instability. Consequently, a rating above 1 means landslide proneness and the reverse is true for a rating below unity.

The time is a further variable determining the proneness of slopes to slide. In fact, for the same combination of spatial causative factors, those slopes having landslides with a greater frequency of reactivation can be prone to slide in a shorter time than those where the frequency of reactivation is lower. The frequency is given by the number of landslide reactivations in the time interval covered by the available aerial photograph surveys.

The implemented method, even if simplified in comparison to other similar approaches (ANABALGAN, 1992; CARRARA *et alii*, 1999; ROTH, 1983), assures a condition of linearity among the variables, which allows the application of the principle of superposition, a condition implicitly assumed in many susceptibility methods but not always assured. Moreover, since it is based on a set of relationships among factors and effect (e.g., how much each factor is represented in the observed landslides), it can be ascribed to the category of direct methods, that means those methods based on direct observation.

The landslide index of a class or category of a given factor arises from the ratio between two parameters a and b (LEE & MIN, 2001). They are the relative number (or percentage) of cells, respectively, of the landslide area and not landslide area in comparison to the respective total. In functional terms, if $N\{F\}$ is the total number of cells of the landslide area and $N\{f_i\}$ is the number of cells of the landslide area belonging to the *i-th* class or category of an examined factor, a_i is:

and likewise we define as b_i the ratio between the number of cells of not landslide area in the same *i-th* class or category, $N\{s_i\}$, and the total cells of not landslide area, $N\{S\}$, that is:

From the given definitions the following properties arise:

$[N\{f_i\} + N\{s_i\}] \times 100 \text{ m}^2 = A_i$ (outcrop area of the *i-th* class or category)

$[N\{F\} + N\{S\}] \times 100 \text{ m}^2 = A_{\text{tot}}$ (total area)

$\sum_i a_i = \sum_i b_i = 1$ (or 100%)

Therefore the *landsliding index* is defined as the ratio:

ossia il rapporto, per ciascuna classe o categoria *i-esima*, della frazione dei pixel in frana rispetto a quelli non in frana, ciascuna normalizzata rispetto al relativo totale. IF_i rappresenta la proporzione relativa delle celle della classe o categoria *i-esima* che contribuiscono all'instabilità rispetto a quelle che non contribuiscono.

In tale modo, se pure una classe o categoria fosse caratterizzata da un modesto valore di *a* per via della ridotta presenza di quella classe o categoria, ma, analogamente, avesse un altrettanto o inferiore valore di *b*, l'indice di franosità risulterebbe certamente più elevato di una classe o categoria per cui si realizzasse la condizione opposta. Al crescere pertanto dell'indice di franosità, aumenta l'incidenza sulla predisposizione all'instabilità, anche a fronte di una modesta presenza sul territorio.

La condizione di *stato limite* per la quale si ha un comportamento invariante rispetto alla predisposizione di un versante a franare è costituita dal valore $IF = 1$. Per tale valore sia ha il classico problema statistico del lancio della moneta: ossia, c'è un'eguale probabilità che la classe o categoria in esame concorra o non concorra all'instabilità. $IF > 1$ indica una predisposizione maggiore all'instabilità che alla stabilità e viceversa per $IF < 1$.

Poiché *IF* può assumere ogni valore compreso tra 0 e ∞ , l'indice di franosità di ciascun fattore *j-esimo* è stato espresso in una scala normalizzata compresa tra 0, nessuna predisposizione, e 100, massima predisposizione; a questo indice normalizzato è stato conferito il nome di *indice di franosità relativo*:

$$IF_{rel,j} = \frac{IF_i}{IF_{i(max)}} \times 100$$

La convenienza di tale normalizzazione consiste nella possibilità di pesare il contributo tra classi o categorie appartenenti a fattori con diversi intervalli di *IF*. A titolo di esempio, la Tabella 2 mostra il calcolo di *IF* e IF_{rel} per le categorie nelle quali il fattore litologia è stato suddiviso.

categories	Landslide occurred		Landslide not occurred		a/b	IF _{rel}
	count	ratio a	count	ratio b		
arenaceous-pelitic	35250	23.49%	35881	16.09%	1.46	100
arenaceous	78914	52.58%	116622	52.30%	1.01	69
marly	26122	17.40%	48167	21.60%	0.81	55
calcareous-marly	9803	6.53%	22305	10.00%	0.65	45
Tot.	150089	Tot.	222975			

Tab. 2 - Esempio di calcolo dell'indice di franosità relativo (IF_{rel}) per il fattore di Litologia
- Calculation example of the relative landsliding index (IF_{rel}) for the factor Lithology

Successivamente, dalla somma pesata degli indici di franosità relativi di ogni fattore (litologia, pendenza, esposizione ed uso del suolo) è stato ottenuto un indice di franosità totale (F_{tot}).

Il peso w_j attribuito a ciascun fattore *j-esimo*, è calcolato sulla base del valore più basso dell'indice di franosità relativo al di sopra del quale ricade almeno il 50% della superficie totale delle aree in frana, denominato *indice di franosità minimo* ($IF_{min,j}$):

Or, in other words, the ratio between landslide cells and not landslide cells, for each *i-th* class or category, normalized to the respective total. IF_i represents the relative proportion of cells of the *i-th* class or category contributing to landsliding respect to those don't.

In such a way, even if *a* class or category were characterized by a small *a*-value owing to a poor presence of that class or category, but similarly it had an equal or lower value of *b*, the landsliding index would certainly result greater than a class or category for which the reverse were true. As the landsliding index increases, the influence of that class or category on the instability proneness also increases, even if its extent on the territory were small.

The value $IF=1$ represents the limit state condition for which an invariant behaviour of that class or category is observed on the determination of a landslide proneness (it is equivalent to tossing the coin!). Values greater than one mean a greater likelihood to give instabilities, and vice versa for $IF < 1$.

Since *IF* may assume any value between 0 and ∞ , a **relative landsliding index** IF_{rel} for each *j-th* factor is defined in a normalized scale from 0 (no proneness) to 100 (maximum proneness), through the following equation:

The convenience of such a normalisation consists in the possibility to weigh the contribution among classes or categories belonging to factors with different ranges of *IF*-values. As an example, Table 2 shows the computation of *IF* and IF_{rel} for the categories into which the factor lithology has been subdivided.

Then, a total landsliding index (IF_{tot}) has been gotten by the weighed sum of the relative landsliding indexes of every factor (lithology, slope, aspect and land use). The weight w_j assigned to each factor, is computed on the basis of the lowest value of the relative landsliding index above which at least 50% of the whole landslide area is included, and this index has been named *minimum landsliding index* ($IF_{min,j}$):

$$\left\{ \begin{array}{l} IF_{tot} = \sum_{j=1}^k IF_{rel,j} \times w_j \\ w_j = \frac{IF_{min,j}}{\sum_{j=1}^k IF_{min,j}} \end{array} \right. \quad j = 1, \dots, k=4$$

L' IF_{tot} esprime, in una scala normalizzata da 0 a 100, la propensione al dissesto, nel senso che al crescere di IF_{tot} cresce la suscettività al franamento.

Come per ogni indice, risulta tuttavia utile definire un valore di soglia che rappresenti la condizione di stato limite del fenomeno descritto dall'indice medesimo. Analogamente al calcolo del peso relativo di ciascun fattore, è stato calcolato il valore più basso dell'indice di franosità totale al di sopra del quale è ricompreso almeno il 50% delle superfici delle aree in frana. Questo indice, denominato IF_{min} , è rappresentativo di una combinazione di fattori di predisposizione al dissesto comune almeno alla metà delle aree in frana esistenti.

Analogamente alla suscettività spaziale, la suscettività temporale è stata calcolata attraverso l'osservazione diretta delle riattivazioni di frana mediante l'analisi multitemporale di foto aeree (ZANUTTA *et alii*, 2006) che coprono un intervallo di tempo sufficientemente lungo per ricostruire l'evoluzione della frana (almeno due riattivazioni successive indipendenti: Tab. 3).

Per consentire la combinazione dei dati di suscettività temporale con quelli della suscettività spaziale, i tempi di ritorno medi delle riattivazioni di frana sono stati classificati in analogia all'indice di franosità relativo (qui denominato IF_{time} , per evitare confusione con gli altri indici: Tab. 4) distribuito virtualmente da 0 (il tempo di ritorno tende all'infinito, ad esempio per pendii stabili) ma in realtà da 20 (il più lungo periodo di ritorno osservato) a 100 (il più breve periodo di ritorno osservato). Naturalmente, nell'analisi effettuata la suscettività temporale si riferisce solo a frane realmente avvenute, essendo derivata dall'osservazione diretta di riattivazioni di frana in un intervallo di tempo significativo.

Infine, è stato definito un indice di suscettività globale mediante le due

IF_{tot} represents, in a normalized scale from 0 to 100, the proneness to slide, namely, as IF_{tot} increases the landslide susceptibility also increases.

Like every index, it results useful to define a threshold value that represents the limit state condition above which a performance requirement is no longer met. Likewise to the procedure outlined above, the lowest value of the total landsliding index above which at least 50% of the landslide area is included, has been computed. This index, labelled as IF_{50} , represents a combination of causative factors common to at least half of the landslide areas.

As for the spatial susceptibility, the temporal susceptibility has been computed through the direct observation of landslide reactivations by means of a multitemporal analysis of aerial photographs (ZANUTTA *et alii*, 2006) spanning a time interval long enough to capture the landslide cycle (at least two successive independent reactivations, Tab. 3).

To allow the temporal susceptibility being joined with the spatial susceptibility, the mean return periods of landslide reactivations have been ranked according to a relative landsliding index (here referred to IF_{time} , Tab. 4) distributed virtually from 0 (the return period tends to infinity, e.g. stable slopes) but really from 20 (the longest observed return period) to 100 (the shortest observed return period). Of course, in our analysis the temporal occurrence refers only to actual landslides, being it derived from the direct observation of landslide reactivations in a meaningful time interval.

Finally, an overall susceptibility index is derived from a two-stage analysis where the spatial susceptibility index is first computed and then combined with the temporal susceptibility index with a relative weight equal to those of the spatial causative factors in order to

Landslide id.#	1955	1974	1978	1984	1991	2000	RP (years)	Historical data
175		N	I	I	R	R	<9	
176	R	I	I	R	R	R	<7	25/04/1977 /09/1996
177	R	I	I	I	I	I	>45	

Tab. 3 - Esempio di dati ricavati dall'analisi multitemporale di foto aeree, integrata da cronache e comunicati stampa. R=riattivato, I=nessuna evidenza di riattivazione, N=frana di prima generazione
- Example of data derived from the multitemporal analysis of aerial photographs, supplemented with chronicles and press information. R=reactivated, I=no evidence of reactivation, N=first-time generated landslide

Classes	Mean Return Period (years)	Annual Probability of Occurrence (%)	IF _{time}
5	Tr < 4	P ≥ 22	100
4	4 < Tr < 10	10 < P < 22	80
3	10 < Tr < 20	5 < P < 10	60
2	20 < Tr < 45	2 < P < 5	40
1	Tr > 45	P ≤ 2	20

Tab. 4 - Classi di pericolosità temporale e relativo indice di franosità associato (IF_{time})
- *Classes of temporal hazard and the associated relative landslide index (IF_{time})*

fasi di analisi, dove l'indice di suscettività spaziale viene prima calcolato e poi combinato con l'indice di suscettività temporale con un peso relativo pari a quello dei fattori predisponenti spaziali, al fine di non sopravvalutare l'influenza delle frane esistenti rispetto alle zone non ancora interessate.

APPLICAZIONE

Il territorio della Regione Marche può essere diviso in tre fasce, allungate in direzione NW-SE parallelamente alla linea di costa, che possono essere definite come zona di pianura, zona collinare e zona montana, procedendo da est a ovest.

L'area campione di Urbino si trova nel settore settentrionale della Regione Marche (Italia centrale) e copre un territorio di circa 37 km² corrispondente ad un intero foglio di mappa (denominato #279080) della carta tecnica regionale in scala 1:10.000. L'area appartiene alla fascia collinare ed è caratterizzata da estesi affioramenti della Formazione Marnoso-Arenacea (oltre il 70% del territorio), costituita dall'alternanza di strati marnosi ed arenaci; questa Formazione rappresenta l'unità più recente (Burdigaliano-Tortoniano) tra quelle affioranti nell'area, mentre la più antica (Scaglia Cinerea) risale all'Oligocene.

Dal punto di vista litologico, l'area è caratterizzata dalla prevalenza di arenarie (oltre il 50%) e, subordinatamente, da litofacies arenaceo-pelitiche e marnose (Fig. 3a).

Dal punto di vista morfologico il territorio è caratterizzato da una serie di rilievi, separati ed incisi da numerosi corsi d'acqua. L'assenza di elementi morfologici dominanti è dimostrata dalla buona distribuzione delle classi di esposizione dei versanti (Fig. 3b).

Al contrario, tra le classi di pendenza domina quella più piatta: quasi il 50% del territorio rientra nella classe tra 10° e 20° e meno del 20% ricade nella classe con acclività maggiore a 30° (Fig. 3c). Ciò è dovuto alla natura litologica ed alle proprietà meccaniche delle formazioni affioranti, che sono soggette a degradazione intensa e a fenomeni atmosferici che non permettono la formazione di pendii ripidi.

Per quanto riguarda l'utilizzo del suolo, la destinazione d'uso prevalente è data dalle aree a semina (oltre il 40%), mentre circa ¼ del territorio risulta coperto da boschi e circa il 20% è destinato a pascolo o ad area incolta (Fig. 3d).

La frazione del territorio interessata da interventi ed insediamenti antropici corrisponde al 10% dell'intera superficie.

Nel contesto morfologico e litologico dell'area di studio, gli

don't overemphasize the influence of existing landslides respect to the areas not yet affected.

APPLICATION

The territory of the Marche Region may be divided into three strips, elongated NW-SE parallel to the coastline and referred to as lowland, hilly and mountainous areas, proceeding from east to west.

The Urbino training area is located in the northern part of the Marche Region (central Italy) and covers a territory of about 37 km² corresponding to a complete map sheet of the regional technical map at scale 1:10,000. It belongs to the hilly strip and it is characterised by the wide outcrop of the Marnoso-Arenacea Formation (over 70% of the territory); made by sequences of marly and arenaceous beddings; it represents the most recent unit (Burdigalian-Tortonian) outcropping in the area, whereas the oldest one (Scaglia Cinerea) dates back to the Oligocene.

From the lithological point of view, the area is characterized by the prevalence of sandstone (over 50%) and, subordinately, by shale and marls (Fig. 3a).

Morphologically, the territory is characterised by a series of ridges, separated and dissected by numerous streams. The absence of dominating morphological features is verified by the well distributed classes of slopes aspect (Fig. 3b).

On the contrary, the slope gradient is dominated by the flattest classes: almost 50% of the territory lies in the slope class 10°÷20° and less than 20% above 30° (Fig. 3c). This is due to the lithological nature and mechanical properties of the outcropping formations, which are subjected to intense degradation and weathering phenomena that don't allow the formation of steep slopes.

The prevalent destination of the land use is arable lands (over 40%), while about ¼ of the territory is covered by forests and about 20% is exploited to pasture or to waste land (Fig. 3d). The proportion of the territory given by build-up areas is about 10% of the whole area.

In the morphological and lithological context of the studied area,

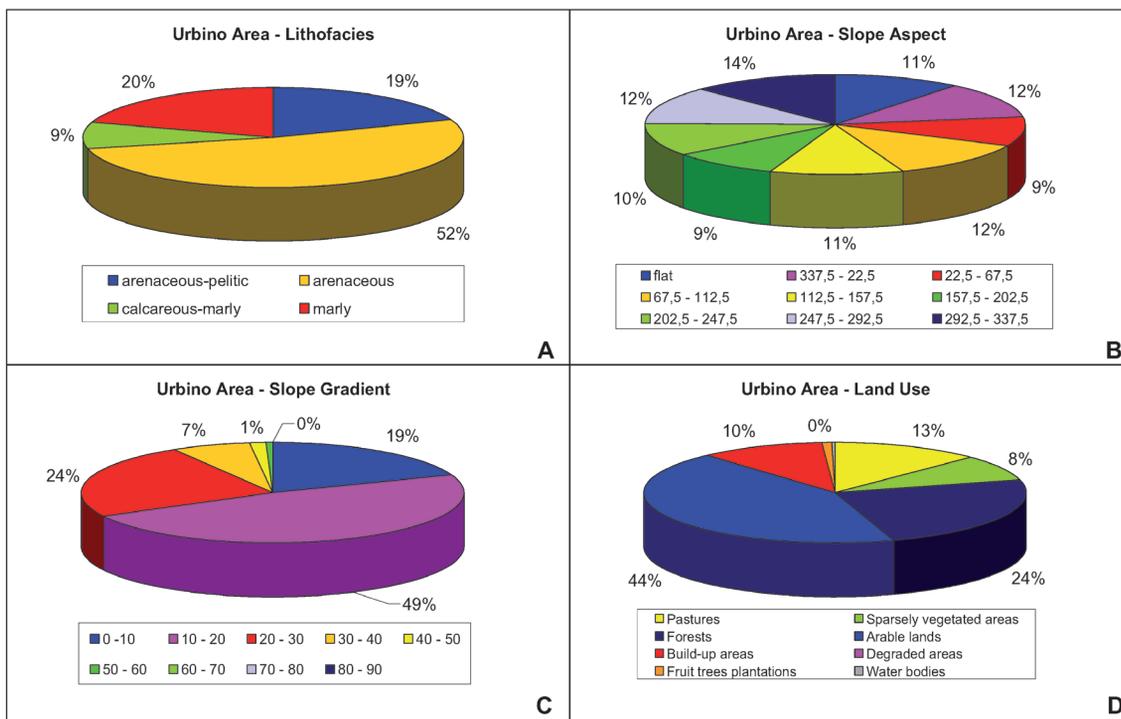


Fig. 3 - I grafici a torta illustrano le distribuzioni delle categorie litologiche (A), delle classi di esposizione dei versanti (B), e della pendenza dei versanti (C) e delle categorie di uso del suolo (D)
- Pie charts showing the distributions of lithological categories (A), slope aspect (B) and slope gradient (C) classes, and land use categories (D)

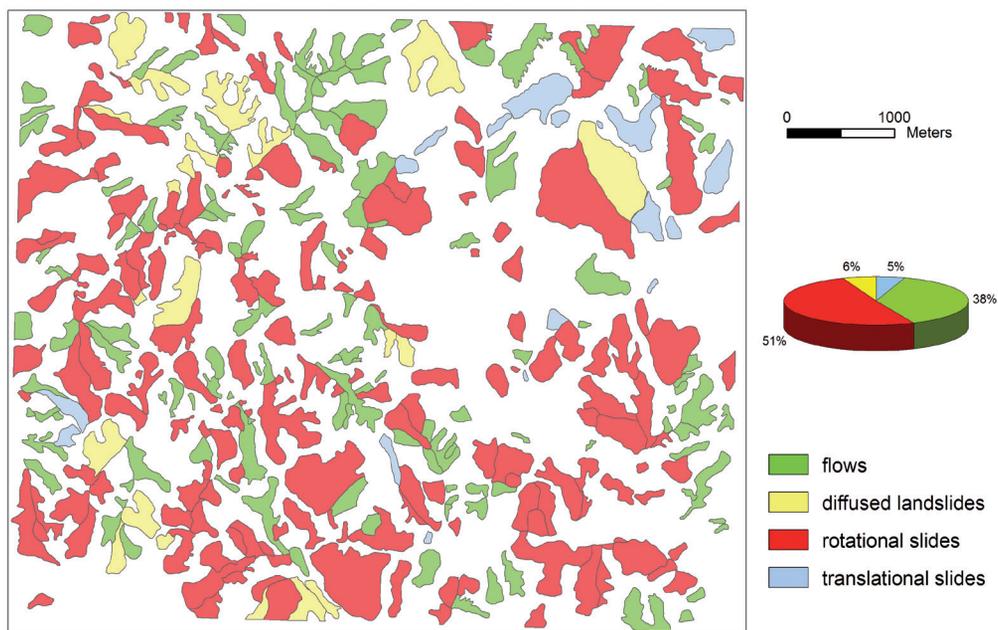


Fig. 4 - Carta inventario delle frane classificate sulla base del loro cinematico
- Landslides inventory map classified on the basis of their kinematics

sviluppi rotazionali costituiscono il tipo di frana più diffuso, la maggior parte dei quali evolve in fenomeni di colamento al piede della frana (Fig. 4).

rotational slumps are the most diffused landslide type, most of them evolving as flows at the landslide toe (Fig. 4).

The methodology presented in this study is improved by the

La metodologia presentata in questo studio è migliorata dalle potenzialità delle tecniche GIS di estrarre, analizzare e gestire grandi quantità di dati georeferenziati.

In primo luogo, è stato costruito un database geografico contenente i dati vettoriali che rappresentano poligoni, linee e punti. Successivamente, i dati vettoriali sono stati convertiti in formato raster al fine di analizzarli secondo una griglia di celle con dimensione 10x10 m, rispettando la risoluzione minima consentita dai dati di input (le carte tematiche elencate nella Tab. 1). Così, per ogni fattore, è stata prodotta una mappa raster di circa 370.000 celle, il cui database contiene le informazioni utili riguardanti i valori della classe o gli attributi della categoria nei quali è stato suddiviso lo stesso fattore. Successivamente, dalla mappa raster dell'inventario delle frane sono state estratte solamente le celle relative alle aree in frana e sovrapposte alle mappe raster di ciascun fattore al fine di attribuire loro la classe o categoria appropriata. Naturalmente, in accordo alla metodologia descritta, la stessa operazione è stata fatta per le celle esterne ai perimetri delle aree in frana. I rispettivi dati sono stati quindi archiviati in un database GIS ed i relativi valori o attributi di ogni cella appartenenti alle due serie di dati (interne ed esterne ai limiti della frana) sono stati esportati da formato raster a formato tabella per eseguire il calcolo di tutti gli indici e coefficienti sopra descritti. Utilizzando le funzioni algebriche disponibili nello strumento *raster calculator*, è stata calcolata la somma pesata degli indici $IF_{rel,j}$ per ottenere l'indice finale IF_{tot} .

Le carte in formato raster prodotte per rappresentare la suscettività da frana per l'area di studio (mappe degli $IF_{rel,j}$ e mappa di IF_{tot}), sono mostrate in Fig. 5.

Osservando la distribuzione interna delle singole classi o categorie in cui ciascun fattore è stato suddiviso, si può anche stabilire l'influenza relativa esercitata da ogni classe o categoria nel determinare l'indice relativo IF_{rel} (Fig. 6), consentendo così di intervenire su quelle che più influenzano la propensione al dissesto per mitigare con

capabilities of GIS technology to extract, analyse, and handle large amount of geographically referenced data.

Firstly, a geo-database was built containing vector data representing polygons, lines and points. Then, vector data were converted in raster formats in order to analyse them as a grid of cells 10mx10m wide, according to the minimum resolution of the thematic maps (see Table 1). Thus, for each factor a raster map of approximately 370,000 cells was produced, whose database contains the appropriate information regarding the class or category into which the factor was divided. Successively, from the raster map of the landslides inventory the cells relative to landslide areas alone were extracted and overlapped to the raster maps of each factor to attribute them the appropriate class or category. Of course, according to the described methodology, the same operation was made for those cells outside the landslide boundaries. The relating data files were then stored into the GIS database and the related values or attributes of each cell belonging to the two datasets (inside and outside the landslide boundaries) were exported from raster to table format to perform the computation of all the indexes and ratios described above. Using algebraic functions provided by the *raster calculator* tool, the weighed sum of the $IF_{rel,j}$ indexes was computed to obtain the final IF_{tot} index.

The raster maps produced to display the landslide susceptibility ($IF_{rel,j}$ maps through IF_{tot} map), are shown in Fig. 5 for the studied area.

Looking at inside the distribution of the individual classes or categories into which each factor has been divided, one can infer the relative influence exerted by each class or category in determining the IF_{rel} index (Fig. 6), thus highlighting the most influencing factors that deserve to be reduced in order to mitigate the landslide susceptibility.

Intersecting the F_{tot} map with the landslide inventory map the index IF_{50} is computed, which represents the lowest F_{tot} value above which at least 50% of the landslide areas are included.

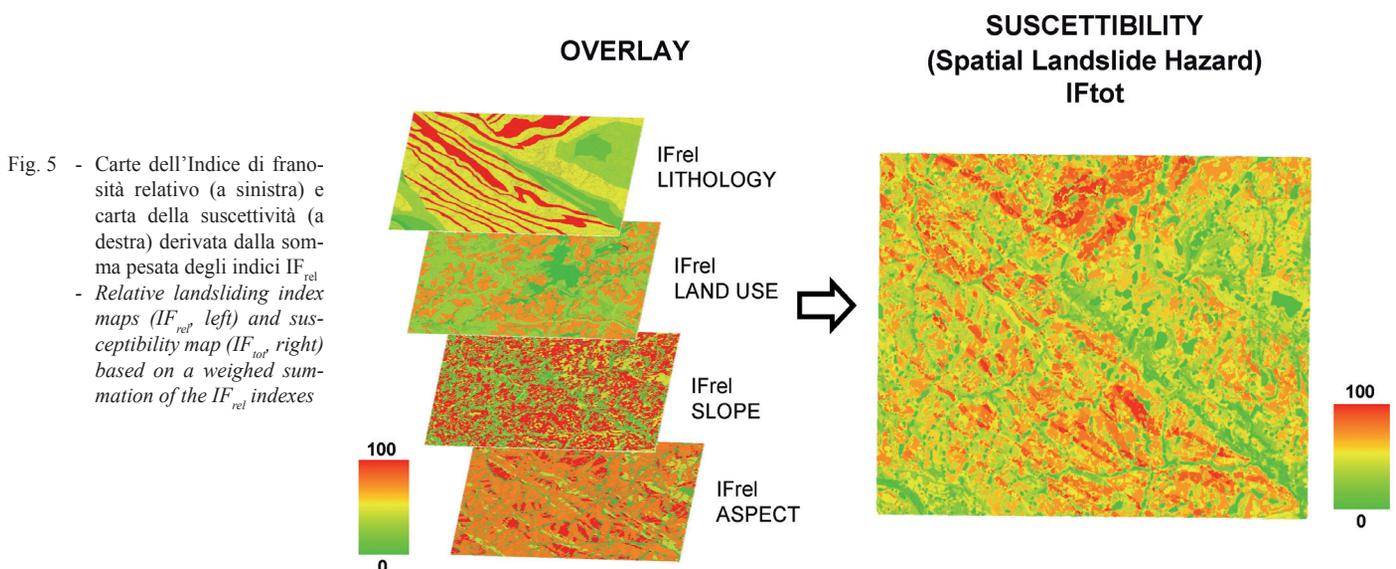


Fig. 5 - Carte dell'Indice di franosità relativo (a sinistra) e carta della suscettività (a destra) derivata dalla somma pesata degli indici IF_{rel}
- Relative landslide index maps (IF_{rel} left) and susceptibility map (IF_{tot} right) based on a weighed summation of the IF_{rel} indexes

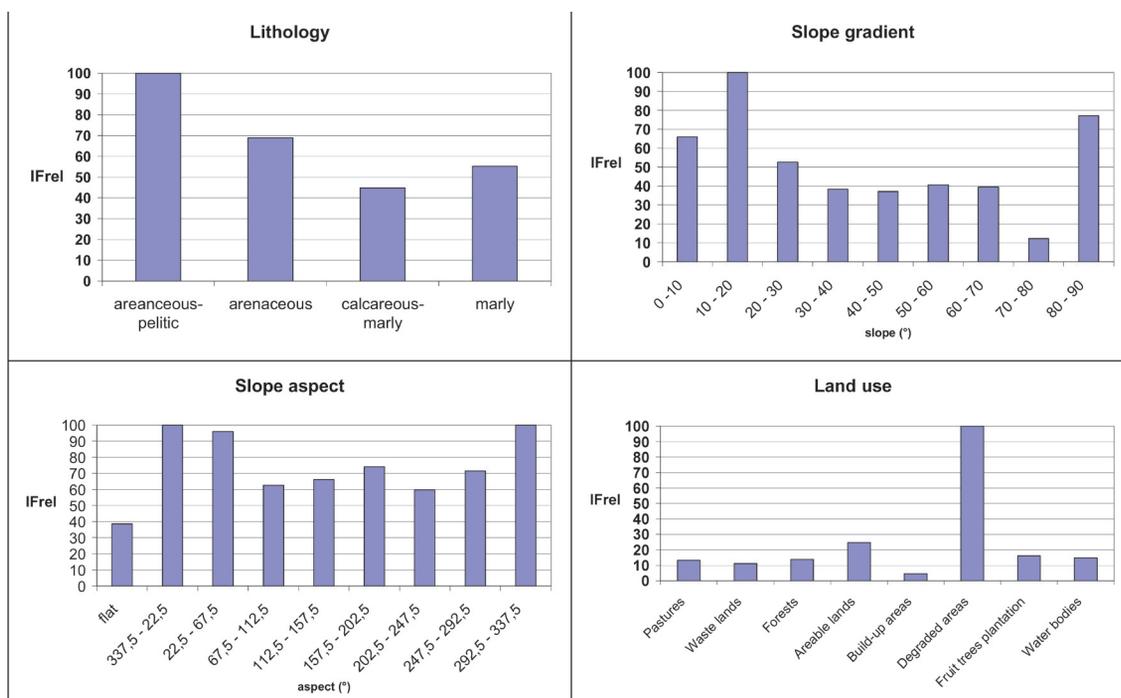


Fig. 6 - Valori di IF_{rel} per le singole classi o categorie in cui i fattori predisponenti sono stati suddivisi. Ogni grafico mostra l'influenza relativa esercitata da ogni classe o categoria nel determinare la suscettività da frana
- IF_{rel} values for individual classes or categories into which factors have been subdivided. Every graph shows the relative influence exerted by each class or category in determining the landslide susceptibility

efficacia il pericolo.

Intersecando la mappa IF_{tot} con la carta inventario delle frane è stato calcolato l'ultimo indice IF_{50} , che rappresenta il valore più basso di F_{tot} al di sopra del quale è compreso almeno il 50% delle aree di frana.

Il risultato è una carta a due colori (Fig. 7) che rappresenta la soglia oltre la quale c'è una maggiore probabilità che una frana si verifichi in futuro. Tale grafica rende più immediata la lettura e l'interpretazione delle aree con propensione a franare rispetto ad una mappa in gradazione continua di colore come F_{tot} .

L'indice IF_{50} ha anche un significato probabilistico (Tab. 5): nelle aree in cui $F_{tot} > IF_{50}$ vi è 1 possibilità su 2 di avere una frana, mentre nelle aree in cui $F_{tot} < IF_{50}$ la possibilità si riduce a 1 su 3.

L'ultima fase di lavoro consiste nella combinazione della pericolosità spaziale e di quella temporale: unendo la carta F_{tot} con la carta IF_{time} si ottiene la carta finale della Pericolosità da Frana (Fig. 8), che deve essere intesa come la probabilità relativa (su base annua) che si verifichi una nuova frana (aree al di fuori dei limiti delle frane esistenti) o che si riattivi una frana (aree all'interno dei perimetri delle frane esistenti).

The outcome is a two-levels map (Fig. 7) representing the threshold above which there is a higher likelihood that a landslide may occur in the future. Such an image is easier to be read and interpreted than a continuous colour-scale map such as F_{tot} . The IF_{50} has also a probabilistic meaning (Tab. 5). In the area where $F_{tot} > IF_{50}$ there is 1 out 2 chance to have a landslide, while in the area where $F_{tot} < IF_{50}$ the chance reduces to 1 out 3.

The last step is the combination of the spatial and temporal components: joining the F_{tot} map with the IF_{time} map the final Landslide hazard map is provided (Fig. 8), which is to be interpreted as the relative likelihood (on an annual basis) of a new landslide to occur (areas outside boundaries of existing landslides) or of a landslide reactivation (areas inside boundaries of existing landslides).

Tab. 5 - Significato probabilistico dell'indice di franosità di soglia IF_{50}
- Probabilistic meaning of the threshold landsliding index IF_{50}

IF_{50}	$IF_{tot} \geq IF_{50}$			$IF_{tot} < IF_{50}$		
	Whole area	Landslide area	Landslide probability	Whole area	Landslide area	Landslide Probability
74	40%	21%	0.53	60%	19%	0.32

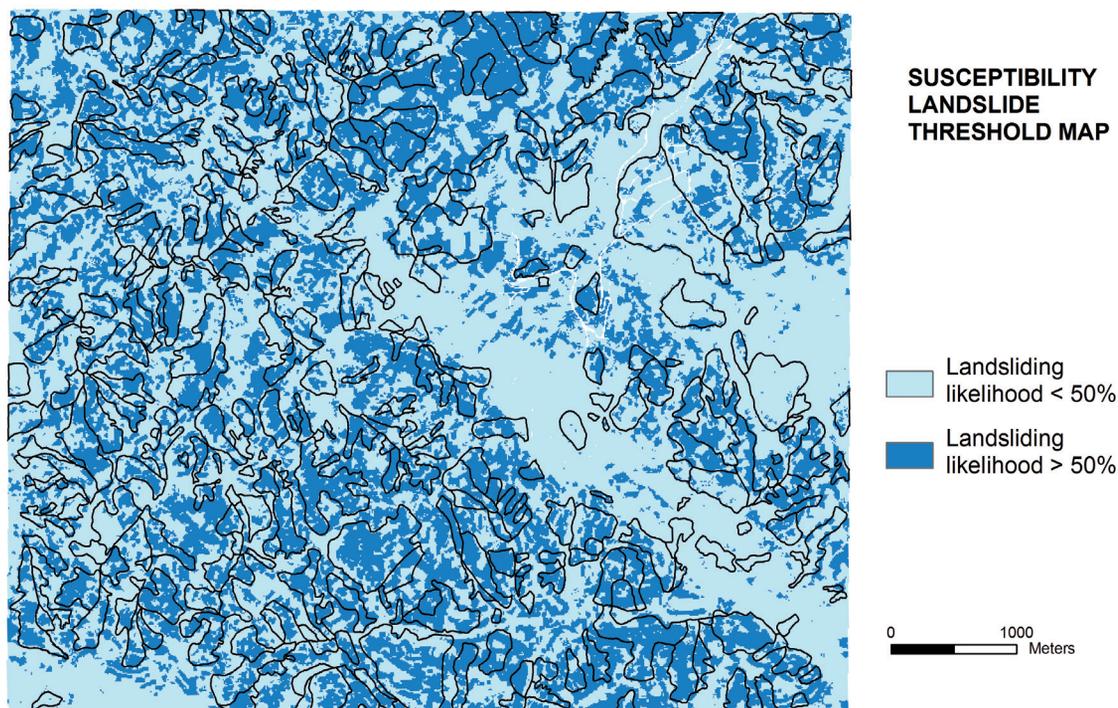


Fig. 7 - Carta della soglia di suscettività da frana ($IF_{50}=74$). Le aree scure ($F_{tot} \geq IF_{50}$) sono rappresentative di una probabilità di frana come mostrato in Tabella 5
- Susceptibility landslide threshold map ($IF_{50}=74$). Darkest areas ($F_{tot} \geq IF_{50}$) are representative of a landslide susceptibility likelihood as shown in Table 5

Spatial Landslide Hazard – Susceptibility ($w_f=4/5$)

Landslide Hazard Map

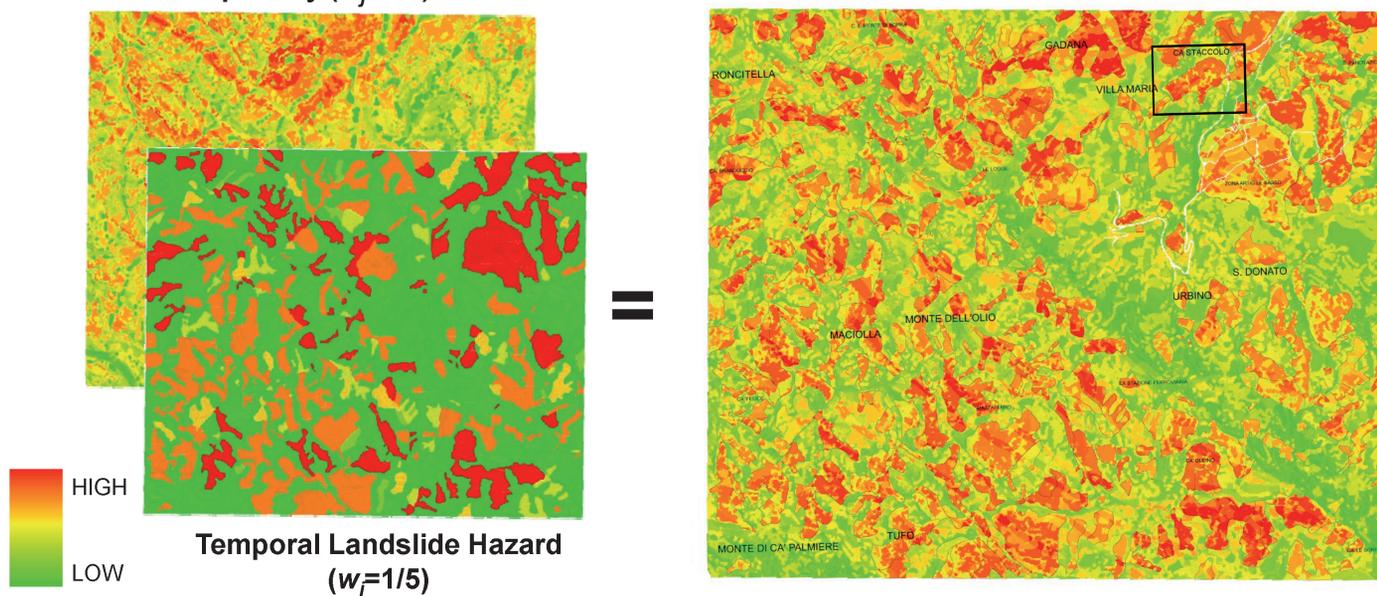


Fig. 8 - Carta dell'indice di pericolosità da frana (a destra), ottenuta sovrapponendo la carta della suscettività e la carta della pericolosità temporale (a sinistra) pesate con una proporzione 4:1. L'area evidenziata con il rettangolo nero sulla carta di destra indica la frana di Ca' Staccolo (id. # 176) illustrata in dettaglio in Fig. 10
- Landslide hazard index map (right), obtained overlapping spatial and temporal landslide susceptibility maps (left) weighed with a proportion 4:1. The black-squared area on the right map refers to the Ca' Staccolo landslide (id. #176) shown in detail in Fig. 10

TEST DI AFFIDABILITÀ

In una nota da segnalare sulla rivista Science, ORESKES *et alii*, 1994 hanno affermato che una ‘validazione’ rigorosa dei modelli numerici nelle Scienze della Terra è una ‘missione impossibile’, ma piuttosto ciò che può essere fattibile è quello di stabilire ‘un certo grado di credibilità o ‘affidabilità’ delle previsioni del modello rispetto alle osservazioni disponibili. Pertanto, allo scopo di testare l’affidabilità della metodologia utilizzata nel presente lavoro, sia la definizione della ricorrenza delle frane (susceptività temporale), sia la valutazione della susceptività da frana complessiva (spaziale più temporale) sono state confrontate con osservazioni indipendenti.

La susceptività temporale calcolata è stata testata attraverso un modello idrologico indipendente e statistico (metodo Generalized Extreme Value, GEV: JENKINSON, 1955) basato sulle correlazioni tra piogge e frane. Tale modello consente di stabilire la periodicità statistica delle condizioni idrologiche simili a quelle che si sono verificate quando la frana è stata innescata, fornendo così informazioni utili sulla sua probabilità di accadimento. A tal fine sono state analizzate 13 frane con data di attivazione certa, per le quali possono essere elaborate le curve di probabilità di pioggia. A titolo di esempio, in Fig. 9 viene mostrata tale verifica per la frana id.# 176. Le curve di probabilità di pioggia sono state calcolate con il Gumbel-tipo I (GUMBEL, 1958) funzione di distribuzione per diversi tempi di ritorno (FLORIS *et alii*, 2004). La linea in grassetto nel grafico mostra le precipitazioni cumulate nei giorni precedenti la frana.

Guardando la Fig. 9, si può osservare che la frana si è verificata dopo un periodo di piogge concentrate, durante il quale sono caduti circa 130 mm di pioggia in una settimana. Tale precipitazione corrisponde ad una pioggia cumulata il cui tempo di ritorno, per questa area, è compreso tra 4 e 10 anni.

Il confronto dei tempi di ritorno calcolati con le due metodolo-

RELIABILITY TEST

In a worth mentioning note on Science, ORESKES *et alii*, 1994 stated that a strictly speaking ‘validation’ of numerical models in the Earth Sciences is a ‘mission impossible’, but rather what may be feasible is to establish ‘a degree of belief’ or ‘a reliability’ of the model predictions respect to the available observations. Therefore, with the purpose to test the reliability of the methodology used in the present work, both the evaluation of the landslide recurrence (temporal susceptibility) and the assessment of the landslide susceptibility as a whole (spatial plus temporal) have been compared with independent observations.

The computed temporal susceptibility has been tested through an independent hydrological and statistical model (Generalized Extreme Value method, GEV: JENKINSON, 1955) based on the relationships between rainfalls and landslides. Such a model allows the establishment of the statistical periodicity of hydrological conditions similar to those occurring when the landslide was triggered, thus providing useful information on its probability of occurrence. To such an end 13 well-dated landslides have been analysed, for which the rainfall probability curves could be elaborated. As an example in Fig. 9 such verification is shown for the landslide number 176. The rainfall probability curves have been calculated with the Gumbel-type I (GUMBEL, 1958) distribution function for different return periods (FLORIS *et alii*, 2004). The boldfaced line in the graph shows the rainfalls cumulated in progressive days previous the landslide.

Looking at Fig. 9, it can be observed that the landslide occurred after a period of concentrated rainfalls during which about 130 mm of precipitation fallen down in one week. Such a precipitation corresponds to a cumulated rainfall whose recurrence period in the area is from 4 to 10 years long.

The comparison of the return periods computed with the two methodologies (Tab. 6) shows a satisfactory correspondence of the

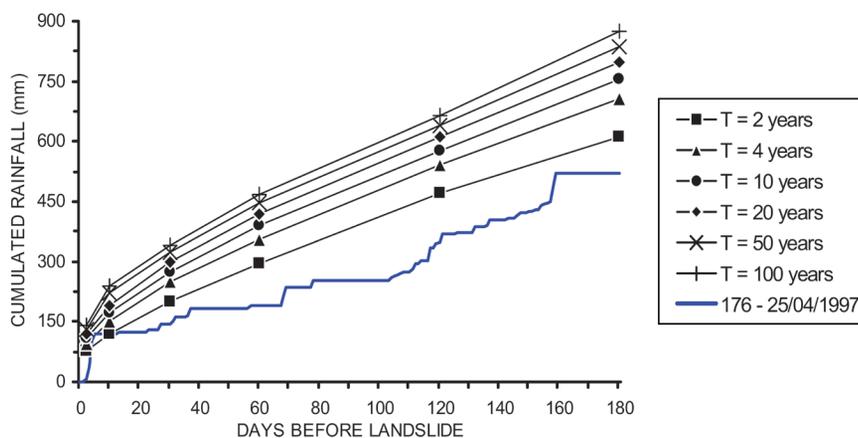


Fig. 9 - Tempi di ritorno medi (in anni) delle piogge cumulate rispetto alle precipitazioni cumulate progressivamente nei giorni precedenti la frana (id.# 176). Dal grafico si può estrapolare un tempo di ritorno medio di riattivazione di 4÷10 anni, che trova una buona corrispondenza con il risultato dell’analisi multitemporale per la stessa frana (cfr. Tab. 6 e il testo per maggiori dettagli)

- Mean return periods (in years) of the cumulated rainfalls compared with the cumulated rainfall in progressive days preceding the landslide (id.# 176). A mean return period of reactivation of 4 to 10 years long may be inferred from the graph, which is in good agreement with the result of the multitemporal analysis for the same landslide (see Tab. 6 and the text for more details)

Landslide id.#	Return Period from multitemporal analysis	Return Period from Landslide/Rainfall relationship
67	4÷10	4÷10
176	4÷10	4÷10
183	4÷10	10÷20
189	< 4	< 2
191	4÷10	< 2
206	4÷10	2÷4
209	< 4	2÷4
239	4÷10	< 2
241	4÷10	< 2
264	4÷10	< 2
274	20÷45	20÷50
306	4÷10	4÷10
307 B	4÷10	< 2

Tab. 6 - Confronto del tempo medio di ritorno calcolato con l'analisi multitemporale delle foto aeree e quello ricavato dalle relazioni frane/precipitazioni for 13 riattivazioni di frana osservate
- Comparison of the mean return periods of landslide reactions computed with the multitemporal analysis of aerial photographs and those inferred from the landslide/rainfall relationships, for 13 recorded landslides reactivations

gie (Tab. 6) mostra una corrispondenza soddisfacente dei risultati; solamente quando il periodo di ritorno calcolato con la correlazione pioggia-frana è molto ridotto (circa 2 anni), possono essere rilevate alcune differenze dovute alla diversa risoluzione del metodo basato sulle riprese aeree che non consente di individuare periodi di ritorno inferiore a 4 anni.

Per quanto riguarda la validazione della carta della pericolosità da frana, in Fig. 8 è stato evidenziato con un rettangolo un piccolo settore allo scopo di mostrare il confronto tra la previsione del nostro modello e l'evoluzione di un movimento di massa ben noto e documentato a scala locale. La frana di Ca' Staccolo, le cui caratteristiche geomorfologiche sono illustrate in Fig. 10b, presenta comportamenti diversi all'interno del suo corpo di frana: i settori più attivi sono concentrati intorno alla corona (vicino alla scarpata di frana), al centro e al piede con immersione verso sud. Nell'ingrandimento della carta di pericolosità da frana (Fig. 10a) la maggior parte delle zone pericolose corrisponde circa agli stessi settori, a conferma che il modello proposto è adatto ad individuare la ricorrenza delle riattivazioni di frana.

CONCLUSIONI

La procedura porta ad elaborare carte tematiche diverse, ognuna con un proprio significato intrinseco:

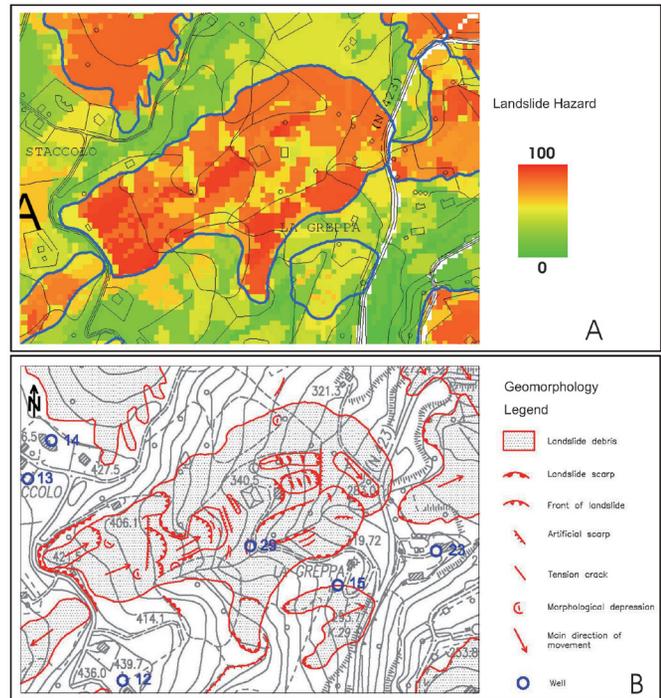


Fig. 10 - Ingrandimento della carta della pericolosità da frana per la frana di Ca' Staccolo. Il confronto tra la previsione della pericolosità da frana (a) e le caratteristiche geomorfologiche della frana (b) mostra il loro buon accordo per quanto riguarda l'affidabilità del modello predittivo rispetto all'evoluzione osservata
- Zoomed-in view of the landslide hazard index map for the Ca' Staccolo landslide area. A comparison between the landslide hazard index map (a) and the geomorphological features of the landslide (b) shows their good agreement as a reliability measure of the prediction model respect to the observed behaviour

results; only when the return period calculated with the rainfall-landslide relationship is very short (around 2 years) some differences can be observed due to the different resolution of the aerial photographs method which doesn't allow to detect return periods less than 4 years.

As it regards the reliability of the landslide hazard index map, in Fig. 8 an area has been boxed to show a comparison between the prediction of our model and the behaviour exhibited by a locally well known and documented mass movement. The Ca' Staccolo landslide movement, whose geomorphological features are shown in Fig. 10b, exhibits different behaviours within its landslide body: the most active parts are concentrated at the crown (near the landslide scarp), in the middle and at the toe dipping southward. The zoomed-in view of the landslide hazard index map (Fig. 10a) predicts the most hazardous areas in almost the same places, confirming that the proposed model is suitable to capture the recurrence of landslide reactivations.

CONCLUSIONS

The procedure brings to display different thematic maps each one with its own intrinsic meaning:

- 4 carte dell'indice di franosità relativo, uno per ogni fattore predisponente ($IF_{rel,i}$); ogni mappa rappresenta il contributo relativo all'innescio di frane di tale fattore. Inoltre, se ogni fattore IF_{rel} è analizzato in base alle classi o categorie in cui è stato suddiviso, è anche possibile evidenziare quali di queste contribuiscono maggiormente alla predisposizione a franare;
- una carta della suscettività spaziale da frana (F_{tot}); F_{tot} è già un indicatore della maggiore o minore propensione a franare: maggiore è l'indice, maggiore è la suscettività, e viceversa. Tuttavia, come ogni variabile continua, è utile definire un valore di soglia che descriva una condizione di stato limite oltre il quale il fenomeno indagato può essere considerato significativo (come uno *stato di allarme*);
- una carta della soglia di suscettività (IF_{50} , la condizione di stato limite appena descritta sopra) che rappresenta il valore minimo di F_{tot} comune ad almeno il 50% delle aree in frana rilevate. Pertanto, IF_{50} è una sorta di interruttore, nel senso che i valori al di sopra di IF_{50} sono più rappresentativi di una condizione di propensione a franare piuttosto che ad una condizione di stabilità, e viceversa per i valori al di sotto;
- una carta della suscettività temporale da frana (IF_{time}) che è limitata alle frane esistenti poiché gli intervalli di ricorrenza sono determinati solamente sulle frane rilevate;
- una carta della suscettività da frana, che combina la suscettività spaziale e quella temporale. Racchiude le potenzialità della componente spaziale mostrando quelle aree che sono più inclini a franare senza tenere conto delle frane realmente osservate, e della componente temporale che evidenzia la frequenza con cui si verificano le frane. Pertanto, questa carta costituisce uno strumento utile per segnalare quelle aree che necessitano prioritariamente di interventi di mitigazione della suscettività.

I principali vantaggi di tale approccio sono: 1) l'uso di database attualmente disponibili presso gli uffici regionali e 2) la restituzione di indicatori quantitativi di predisposizione e carte di facile lettura ed interpretazione. Inoltre, il metodo, basato su tecniche GIS, si presta bene per ulteriori sviluppi ed implementazioni, primo tra tutti la realizzazione di carte formali del rischio da frana (ROMEO *et alii*, 2006). E, ultimo ma non meno importante, la procedura può essere facilmente integrata con studi mirati a definire le soglie di innescio di frane, come le piogge (FLORIS & BOZZANO, 2007; IVERSON, 2000) ed i terremoti (ROMEO *et alii*, 2007), per lo sviluppo di sistemi di monitoraggio e di allarme che, insieme con la pianificazione territoriale e dell'uso del suolo, possono contribuire a ridurre gli effetti da frana a scala regionale.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata finanziata dal Servizio Protezione Civile della Regione Marche, contratto No. 481/SPS/20041213.

OPERE CITATE / REFERENCES

- ALEOTTI P. & CHOWDHURY R. (1999) - *Landslide hazard assessment: summary reviews and new perspectives*. Bulletin of Engineering Geology and Environment, **58**: 21 -44.
ANABALGAN R. (1992) - *Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain*. Engineering Geology, **32**: 269 -277.

- four relative landsliding index maps, one for each causative factor ($IF_{rel,i}$); every map represents the relative contribution to sliding of that factor. Furthermore, if each IF_{rel} factor is exploded into the classes or categories into which it has been divided, it is also possible to highlight which of them contribute most to the landsliding proneness;
- one spatial landslide susceptibility map (F_{tot}); F_{tot} is already an indicator of the greater or smaller proneness to slide: the greater the index, the greater the susceptibility, and vice versa. Nevertheless, as every continuous variable, it is useful to define a threshold value that describes a limit state condition above which the investigated phenomenon can be regarded as significant (like a *state of warning*);
- one susceptibility threshold map (IF_{50} , the limit state condition just described above) that represents the minimum F_{tot} value common to at least 50% of the actual landslide areas. Therefore, IF_{50} is a kind of switch, in the sense that values above are more representative of a proneness condition to slide than not, and vice versa for values below;
- one temporal landslide susceptibility map (IF_{time}) which is restricted to the existing landslides since the recurrence intervals are determined on the actual landslides alone;
- one landslide susceptibility map, which couples the spatial and temporal susceptibility. It joins the power of the spatial component showing those areas that are more prone to slide without any regard to the actually observed landslides, with the temporal component showing how frequently landslides occur. Thus, this map is a powerful tool to point out those areas which require priority measures of susceptibility mitigation.

The main advantages of such an approach are 1) the use of databases currently available in regional governmental offices and 2) the restitution of quantitative indicators of proneness and easy reading and interpreting maps. Furthermore, the method is based on the GIS technology which is well suitable for further developments and implementations, first of all the realization of formal landslide risk maps (ROMEO *et alii*, 2006). And last but not least, the procedure can be easily integrated with studies aimed to define the triggering thresholds of landslides such as rainfall (FLORIS & BOZZANO, 2007; IVERSON, 2000) and earthquakes (ROMEO *et alii*, 2007), for the development of monitoring and warning systems that, along with the territorial and land use planning, can all together contribute to mitigate the landslide effects at regional scale.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was funded by the Civil Protection Service of the Marche Regional Government, under the grant No. 481/SPS/20041213.

- ANTONINI G., CARDINALI M., GUZZETTI F., REICHENBACH P. & SORRENTINO A. (1993) - *Landslides inventory map of marche Region and surrounding areas*. GNDCl, Publ. Nr. 580, scale 1:100.000, 2 Sheets, Arti Grafiche L. Salomone, Rome.
- CARRARA A. (1983) - *A multivariate model for landslide hazard evaluation*. *Mathematical Geology*, **15**: 403 -426.
- CARRARA A. & MERENDA G. (1976) - *Landslide Inventory in Northern Calabria, Southern Italy*. *Geological Society of American Bulletin*, **87**(8): 1153 -1162.
- CARRARA A., CARDINALI M., DETTI R., GUZZETTI F., PASQUI V. & REICHENBACH P. (1991) - *GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard*. *Earth Surface Processes and Landform*, **16**: 427 -445.
- CARRARA A., GUZZETTI F., CARDINALI M. & REICHENBACH P. (1999) - *Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard*. *Natural Hazards*, **20**(2-3): 117 -135.
- CHEN Z. & WANG J. (2007) - *Landslide hazard mapping using logistic regression model in Mackenzie Valley, Canada*. *Natural Hazards*, **42**(1): 75 -89.
- EINSTEIN H.H. (1988) - *Special lecture: landslide risk assessment procedure*. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*, **2**: 1075 -1090.
- FENTI V., SILVANO S. & SPAGNA V. (1979) - *Methodological proposal for an engineering geomorphological map. Forecasting rock-falls in the Alps*. *Bulletin of IAEG*, **19**: 134 -138.
- FLORIS M., MARI M., ROMEO R.W. & GORI U. (2004) - *Modelling of landslide-triggering factors- a case study in the Northern Apennines, Italy*. *Lecture Notes in Earth Sciences n.104*, Hack, Azzam and Charlier eds., pp. 745 -753, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- FLORIS M. & BOZZANO F. (2007). *Evaluation of landslide reactivation: A modified rainfall threshold model based on historical records of rainfall and landslides*. *Geomorphology*, **94**(1-2): 40 -57
- 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 technique*. *Engineering Geology*, **44**: 147 -161.
- GORSEVSKI P. V., GESSLER P. & FOLTZ R. B. (2000) - *Spatial prediction of landslide hazard using discriminant analysis and GIS*. In: *GIS in the Rockies 2000 Conference and Workshop: applications for the 21st Century*, Denver, Colorado, September 25 - 27, 2000.
- GUMBEL E.J. (1958) - *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York, 375 pp.
- 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.
- ISPRA (2007) - *Inventario dei fenomeni franosi in Italia*. Rapporti 78/2007, Available online at the web-address: <http://www.isprambiente.it/site/it-IT/Progetti/IFFI>
- IVERSON R. M. (2000) - *Landslide triggering by rain infiltration*. *Water Resources Research*, **36**(7): 1897 -1910.
- JENKINSON A.F. (1955) - *The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological events*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **87**: 158 -171.
- KIENHOLZ H. (1978) - *Maps of Geomorphology and Natural Hazard of Griendelwald, Switzerland, scale 1:10.000*. *Artic and Alpine research*, **10**: 169 -184.
- KINGSBURY P.A., HASTIE H.J. & BENTLEY S.P. (1992) - *Regional landslip hazard assessment using a geographic information system*. *Proceedings 6th International Symposium on Landslides*. D.H. Bell (editor), Christchurch, N.Z.: 995 -999.
- LEE S. & MIN K. (2001) - *Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea*. *Environmental Geology*, **40**: 1095 -1113.
- LEE S., UEECHAN C. & MIN K. (2002) - *Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea*. *Geomorphology*, **46**(3-4): 149 -162.
- NATOLI, S., PRESTININZI, A. & ROMAGNOLI, C. (1992) - *Determinazione della pericolosità di frana: un esempio di applicazione di una nuova metodologia*. *Geologia Romana*, **30**: 381-394.
- ORESQUES, N., SHRADER-FRECHETTE, K. & BELITZ, K. (1994) - *Verification, validation, and confirmation of numerical models in the Earth Sciences*. *Science*, **263**: 641 -646.
- REICHENBACH P., GALLI M., CARDINALI M., GUZZETTI F. & ARDIZZONE F. (2005) - *Geomorphological mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of central Italy*. In: GLADE, T., ANDERSON, M.G. & CROZIER, M.J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, pp. 429 -468.
- ROMEO R.W., FLORIS M. & VENERI F. (2006) - *Area-scale landslide hazard and risk assessment*. *Environmental Geology*, **51**(1): 1 -13.
- ROMEO R.W., JIBSON R.W. & PUGLIESE A. (2007) - *A methodology for assessing earthquake-induced landslide risk*. *Proceedings 1st North American Landslide Conference (NALC)*, Vail, Colorado, June 3-8, 2007, AEG Special Publication No. **23**: 867 -875.
- ROTH R.A. (1983) - *Factors affecting landslide-susceptibility in San Mateo County, California*. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, **20**(4): 353 -372.
- RUPKE L., CAMMERAAT E., SEIMONSBERGEN A.C. & VAN WESTEN C.J. (1988) - *Engineering geomorphology of Widentobel Catchment, Switzerland: a geomorphological inventory system applied to geotechnical appraisal of slope stability*. *Engineering Geology*, **26**: 33 -68.
- SANTACANA N., BAEZA B., COROMINAS J., DE PAZ A. & MARTURIA J. (2003) - *A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain)*. *Natural Hazards*, **30**(3): 281 -295.
- STEVENSON P.C. (1977) - *An empirical method for the evaluation of the relative landslip risk*. *Bulletin of IAEG*, **16**: 69 -72.
- ZANUTTA A., BALDI P., BITELLI G., CARDINALI M. & CARRARA A. (2006) - *Qualitative and quantitative photogrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis*. *Annals of Geophysics*, **49**(4-5): 1067 -1080.

Received November 2010 - Accepted July 2011