

APPROCCIO STATISTICO E TECNICHE GIS PER LA VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ DI FRANA IN UN'AREA CAMPIONE DELLA VALLE DEL SERCHIO (ITALIA)

STATISTICAL APPROACH AND GIS TECHNIQUES IN EVALUATING LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY IN A SAMPLE AREA OF THE SERCHIO RIVER BASIN (ITALY)

FRANCESCO FALASCHI(*), PAOLO ROBERTO FEDERICI(*), ALBERTO PUCCINELLI(*),
GIACOMO D'AMATO AVANZI(*), ALBERTO POCHINI(*), MATTEO SPAGNOLO(*),
MARCO BOTTAI(**) & NICOLA SALVATI(**)

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Pisa, Via S.Maria 53 - 56126 Pisa (Italy)

(**) Dipartimento di Statistica e Matematica Applicata all'Economia, Università degli Studi di Pisa, Via Ridolfi 10 - 56124 Pisa (Italy)

RIASSUNTO

Lo scopo di questo lavoro è quello di dare un contributo sperimentale alla valutazione della pericolosità geologica connessa all'instabilità dei versanti, in un'area della media valle del Fiume Serchio.

Le particolari caratteristiche geologico-strutturali, geomorfologiche, meteo-climatiche e sismiche di questa regione causano un'alta densità di dissesto. Questo studio ricade in un più ampio progetto promosso dalla Regione Toscana e dall'APAT - Servizio Geologico Nazionale con lo scopo di definire la pericolosità di frana all'interno dell'area del foglio 250 - Castelnuovo di Garfagnana (scala 1:50.000).

Attraverso lo studio geomorfologico di dettaglio è stato possibile mettere in evidenza i processi morfogenetici e le forme connessi con l'instabilità e realizzare una carta inventario dei fenomeni franosi. Lo studio delle caratteristiche geologiche e litologico-tecniche ha permesso di caratterizzare il substrato roccioso e le coperture dal punto di vista delle loro proprietà fisico-meccaniche. Il lavoro di zonazione dei versanti sulla base della predisposizione al dissesto si è svolto per passi successivi. Inizialmente è stato identificato un numero limitato di fattori predisponenti, relativi alle caratteristiche litologico-tecniche delle formazioni, all'acclività ed esposizione dei versanti, alla distanza dai corsi d'acqua ed ai principali lineamenti tettonici. Successivamente, l'analisi spaziale dei fattori predisponenti al dissesto, organizzati in un set di layer diversificati e l'applicazione di metodologie statistiche hanno permesso di valutare quantitativamente le interrelazioni esistenti tra i fattori predisponenti ed i fenomeni franosi. In questo studio sono stati applicati due distinti metodi statistici, entrambi di tipo indiretto e quantitativo con l'obiettivo di giungere ad una zonazione del territorio in aree con gradi di propensione al dissesto, o pericolosità relativa, diversificati.

PAROLE CHIAVE: pericolosità di frana, analisi statistica multivariata, GIS, Toscana, Italia

INTRODUZIONE

Lo scopo di questo lavoro è valutare la suscettibilità di frana, in un'area campione del Bacino del Fiume Serchio, con particolare attenzione all'approccio statistico del metodo. Le relazioni tra i fattori di instabilità dei versanti e la frequenza dei dissesti sono state

ABSTRACT

The aim of this experimental study is to evaluate landslide susceptibility in a sample area of the Serchio River Basin by means of statistical approach and GIS techniques. The study area is characterized by high landslide susceptibility, because of the geological, geomorphological and climatic characteristics of the basin. This area is one of the rainiest in Italy and it is frequently hit by severe rainstorms, which often cause many landslides, involving villages, infrastructures and crops. This study is included in a wider research project, promoted by the Tuscany Region Administration and APAT - Italian Geological Survey, aimed at defining landslide hazard in the area of the Sheet 250 Castelnuovo di Garfagnana (1:50 000 scale).

This study is first based on a geomorphologic investigation, in order to realize a landslide inventory map and understand the relationship between geomorphological processes and instability. Eventually, geological and geo-engineering investigations were also performed. Landslide susceptibility assessment proceeded step-by-step. At first, the selection of a certain number of instability factors was performed, according with the geological and geomorphological settings of the study area: geo-engineering characterization of geological formations, slope, aspect, distance from rivers, distance from tectonic elements. Eventually, GIS-supported spatial analysis of landslide distribution related to the presence of instability factors, and statistical analysis, both allowed to better constrain the connections between landslide distribution and instability factors with a quantitative response.

The outcome of this study is a classification of the land surface into different susceptibility domains using two distinct statistical methods, both indirect and quantitative.

KEY WORDS: landslide susceptibility, multivariate statistical analysis, GIS, Tuscany, Italy

INTRODUCTION

The aim of this work is to evaluate landslide susceptibility in a sample area of the Serchio River Basin, with a particular regard to the statistics of the method. The relationships between slope instability factors and landslide occurrence and frequency have already been

oggetto di numerosi studi nel bacino del Serchio (D'AMATO AVANZI *et alii*, 2000, *cum bibl.*). Si tratta di approcci di tipo diretto, semi-quantitativo, ovvero basati sull'analisi dirette della cartografia geologica e geomorfologica e su alcune considerazioni derivate dal calcolo dell'indice di frana relativo alle sole formazioni geologiche. Tale approccio risente tuttavia di una forte soggettività intrinseca, legata al giudizio esperto dell'operatore.

L'approccio seguito in questo studio è invece di tipo indiretto-quantitativo. E' stata effettuata un'analisi spaziale dei fattori predisponenti al dissesto e sono state applicate l'analisi statistica bivariata (analisi condizionale) e l'analisi multivariata. Nella prima fase di studio, le indagini geomorfologiche, geologiche e litologico-tecniche hanno permesso un'analisi dettagliata dei processi morfogenetici e delle proprietà fisiche e meccaniche delle rocce e delle coperture. Successivamente, sono stati analizzati i fattori predisponenti al dissesto confrontandoli con la distribuzione dei fenomeni franosi e, attraverso le tecniche di analisi statistica multivariata, è stato possibile valutare quantitativamente l'entità delle interrelazioni tra i fattori predisponenti e l'occorrenza delle frane, ottenendo risultati affidabili, caratterizzati da un maggiore oggettività (AMANTI *et alii*, 1992; CARRARA, 1983; CARRARA *et alii*, 1985, 1990, 1991, 1992, 1995a, 1995b; MARK & ELLEN, 1995; CLERICI & DALL'OLIO, 1995; CLERICI *et alii*, 2002; AYALEW & YAMAGISHI, 2004; Federici *et alii*, 2005, 2006). Vengono inoltre presentati alcuni risultati preliminari corredati dalle relativa cartografia tematica.

CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E GEOMORFOLOGICHE

Il Serchio è un fiume di notevole importanza nella Toscana Nord-Occidentale (Italia): l'estensione areale del bacino imbrifero è pari a circa 1400 km² (Figg. 1, 2) ed il fondovalle, dalle sorgenti alla foce, misura più di 100 chilometri in lunghezza e 25 km in larghezza. Gran parte della porzione medio-alta della valle del Serchio, che comprende l'area di studio, si configura come un tipico bacino intermontano facente parte della depressione tettonica della Garfagnana. Tale depressione si colloca all'interno della storia evolutiva dell'Appennino Settentrionale, una catena montuosa formata principalmente nel Cretaceo Superiore - Miocene Superiore. Dal Miocene Superiore, la tettonica di tipo distensivo ha dato origine a depressioni tettoniche limitate da faglie con direzione NW-SE, nelle quali si sono sedimentate potenti successioni fluvio-lacustri.

In quest'area affiorano diverse unità tettoniche (Fig. 1) appartenenti a domini paleogeografici differenti, di seguito elencati. Da Sud-Ovest a Nord-Est: Dominio Ligure (Unità Ottone, Dominio Subligure, Dominio Toscano) (PUCCINELLI *et alii*, *in stampa*). I depositi continentali villafranchiani, facenti parte dei bacini fluvio-lacustri di Castelnuovo di Garfagnana e di Barga (PERILLI *et alii*, 2004), affiorano soprattutto nella parte centrale della depressione della Garfagnana.

Il regime pluviometrico in questo territorio è quello tipico delle

studied in the Serchio basin (D'AMATO AVANZI *et alii*, 2000 and references therein). These papers focus on a direct-geomorphological approach to the landslide susceptibility assessment, based on the ability of the scientist to evaluate the connection between instability factors and landslide occurrence. The disadvantages of this method come from its high level of subjectivity.

The approach followed in this paper is indirect and quantitative. GIS-supported spatial analysis of instability factors was performed, and a statistical method was applied by means of conditional and multivariate analysis. At first, geomorphological, geological and geoenvironmental investigations were done in order to understand surface processes and analyse the physical and mechanical properties of rock and soil. Then, connections between instability factors and landslide distribution were calculated by matching the landslide inventory with thematic maps, or layers, corresponding to each instability factors. The effectiveness of each factor considered in the statistical analysis was evaluated along with the multivariate statistical approach in a more objective and quantitative response. Landslide susceptibility evaluation by means of multivariate regression model becomes an operation as objective as possible (AMANTI *et alii*, 1992; CARRARA, 1983; CARRARA *et alii*, 1985, 1990, 1991, 1992, 1995a, 1995b; MARK & ELLEN, 1995; CLERICI & DALL'OLIO, 1995; CLERICI *et alii*, 2002; AYALEW & YAMAGISHI, 2004; FEDERICI *et alii*, 2005, 2006). Here some preliminary results and maps are presented.

GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL SETTING

The Serchio is the second large river in Tuscany (Italy) with a basin of about 1400 km² (Figs 1, 2), and an overall length, from the sources to the mouth, of more than 100 km. Most of the mid-upper Serchio River valley, a typical intermountain basin, which includes the study area, falls within the Garfagnana tectonic depression. The origin of this depression relates to the Northern Apennines, a fold and thrust chain mainly formed during the Upper Cretaceous–Upper Miocene. Since the upper Miocene, tensional tectonics occurred and gave origin to several tectonic depressions bounded by NW-SE trending normal faults, within which either marine or continental successions deposited.

Here, several geological units crop out (Fig.1) belonging to different paleogeographic domains. From South-West to North-East they are the Ligurian, Subligurian and Tuscan domains (PUCCINELLI *et alii*, *in press*). Villafranchian continental deposits also crop out in the central part of the tectonic depression. They are part of the Barga and Castelnuovo di Garfagnana fluvial-lacustrine basins (PERILLI *et alii*, 2004).

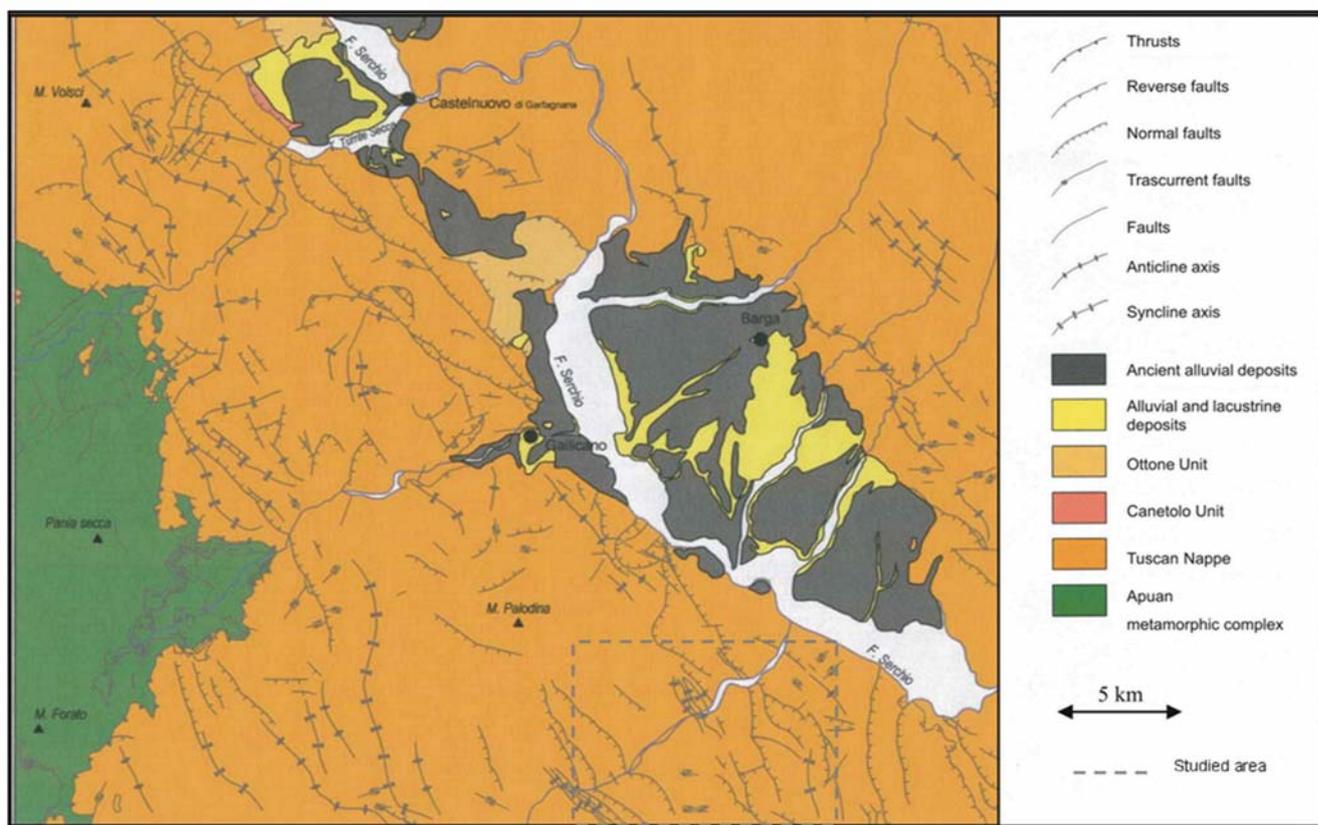


Fig. 1 - Schema tettonico della media valle del Serchio (PUCCINELLI *et alii*, in stampa)
 - Tectonic sketch of the middle Serchio Valley (PUCCINELLI *et alii*, in press)

zone interne dell'Appennino Settentrionale, con medie pari a 1500 – 2000 mm annui e picchi di 3000 mm in corrispondenza delle vette più alte delle Alpi Apuane (Fig. 2) (BALDACC *et alii*, 1993). L'intensità può raggiungere i 100 mm in tre ore (1987), 158 mm/ora e 500 mm in 12 ore, in riferimento all'evento catastrofico del 1996. Ciò porta ad un rapido aumento del deflusso superficiale ed il generarsi di numerose colate rapide di detrito (D'AMATO AVANZI *et alii*, 2000).

Inoltre, quest'area della Toscana settentrionale presenta un rischio sismico elevato, come documentato da numerosi terremoti di intensità sismica elevata, registrati negli anni 1481, 1545, 1641, 1740, 1834, 1921, 1939. In particolare, l'evento sismico del 7 settembre 1920 raggiunse il X grado della scala Mercalli provocando vittime, effetti devastanti in molti villaggi della media Valle del Serchio e numerosi eventi franosi (D'AMATO AVANZI *et alii*, 1995, 2000).

L'area di studio (Figg. 1, 3) è situata in destra idrografica del Fiume Serchio e rappresenta la parte terminale del bacino del Torrente Turrîte Cava, che scorre prevalentemente in direzione SW-NE. L'estensione areale è di circa 20 km² ed il contesto geologico coinvolge la Falda Toscana (BALDACC *et alii*, 1967) dalla Formazione del Calcare Selcifero di Limano alla Formazione del Macigno, al tetto della successione. Differenti litotipi affiorano in questa zona, con resi-

Annual rainfall is about 1500-2000 mm in average, a typical value in the internal Apennines zones, exceeding 3000 mm/year near the highest peaks of the Apuan Alps (Fig. 2) (BALDACC *et alii*, 1993). Rainfall events could be very intense as in the 1987 rainstorm when intensity reached 100 mm within 3 hours or in 1996 when it reached 158 mm/hour and 500 mm within 12 hours. This can cause rapid increase of discharge and disruptive debris flows (D'AMATO AVANZI *et alii*, 2000). Moreover, strong earthquakes may affect this area, as it happened in 1481, 1545, 1641, 1740, 1834, 1921, and 1939. In particular, the seismic event of September 1920 reached the intensity X (MCS) causing death, destruction of landscape and villages, and several landslides (D'AMATO AVANZI *et alii*, 1995, 2000).

The study area (Figs. 1, 3) is located on the right side of the valley and represents the terminal part of the Turrîte Cava River Basin, running SW-NE. It is about 20 Km² wide and its geological setting involves the Tuscan Nappe (BALDACC *et alii*, 1967,) from Calcare Selcifero di Limano Formation to Macigno Formation at the top. Many different rock types crop out varying in strength from hard to very weak. Geological structure refers to a gentle anticline with its core in the Calcare Selcifero di Limano Fm., cropping out near Turrîte Cava, in the eastern part of the study area. This structure is

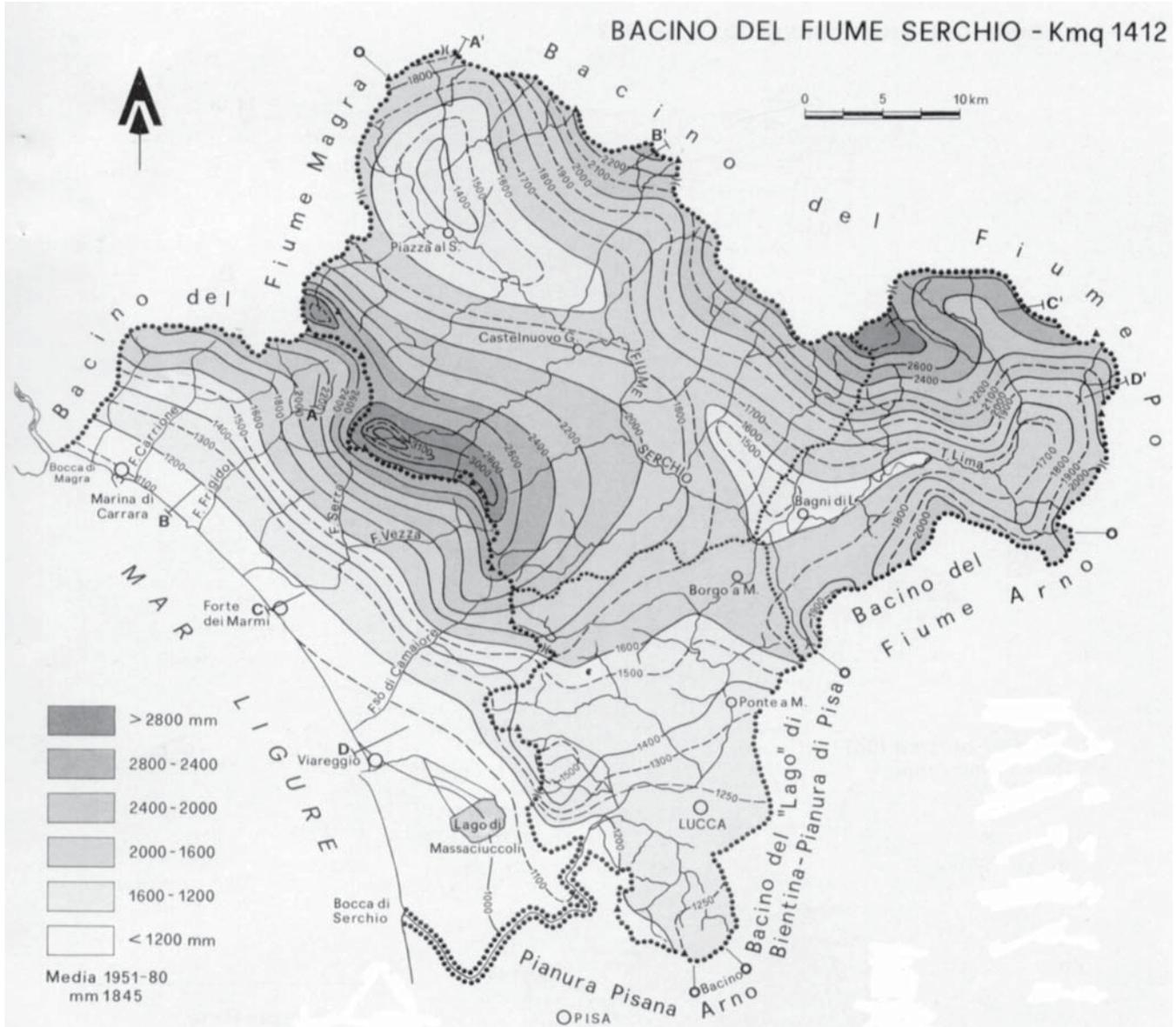


Fig. 2 - Mappa delle isoiete del Bacino del Serchio (BALDACCI *et alii*, 1993)
 - Isohyets map of the Serchio river basin (BALDACCI *et alii*, 1993)

stenza variabile, da molto resistenti a deboli. La struttura geologica è riferibile ad una blanda anticlinale con nucleo nella formazione del Calcere Selcifero di Limano, affiorante in prossimità del Torrente Turrite Cava, nella porzione più orientale dell'area di studio. Tale struttura è attraversata da numerose faglie dirette disposte NW-SE che sono più frequenti in corrispondenza del fianco Nord-Orientale dell'anticlinale, al bordo della depressione tettonica della valle del Serchio. I movimenti verticali delle fasi tardive dell'orogenesi, ancora attive, sono responsabili della notevole energia di rilievo che caratte-

crossed by several normal faults running NW-SE. These are particularly dense near the NE flank of the anticline, bounding the Serchio river valley. Vertical movements of the late orogenic phases, still active, are responsible for the high relief that characterizes the area (FEDERICI & RAU, 1980) and made it possible to recognize the fault displacements directly in the field. Mountain slopes are frequently densely fractured and crossed by several tectonic discontinuities, thus increasing slope instability. Moreover, fluvial morphogenesis shows recent activity and highly influences insta-

rizza quest'area (FEDERICI & RAU, 1980) ed i rigetti sono stati spesso riconoscibili durante il rilevamento. I versanti sono densamente fratturati ed attraversati da numerose discontinuità di origine tettonica, che contribuiscono ad aumentare la loro propensione al dissesto. Inoltre, l'erosione fluvio-torrentizia mostra segni di attività favorendo l'instabilità dei versanti. I fenomeni carsici, particolarmente evidenti in un'area ristretta posta al di sopra degli 800 m di altitudine, contribuiscono ad aumentare la degradazione delle rocce carbonatiche. Dunque, i movimenti franosi dominano in modo preponderante il paesaggio.

Molti autori hanno descritto e cartografato le caratteristiche della franosità in questo territorio (NARDI *et alii*, 1986, 1987, 2000; D'AMATO AVANZI *et alii*, 1993, 2000). La tipologia di frana maggiormente frequente nell'area studiata corrisponde a scivolamenti rotazionali e scivolamenti-colata (CRUDEN & VARNES, 1996) che interessano soprattutto la Scaglia toscana e le Argille sabbie e conglomerati di Fornaci di Barga, nonché le relative coperture detritiche. Gli scivolamenti traslativi interessano con maggior frequenza le rocce competenti (calcari e arenarie) e le coperture detritiche del Macigno. La presenza di depositi di versante di scarsa consistenza o sciolti ricopre un ruolo di primaria importanza in relazione ai fenomeni superficiali attivi nell'area. I movimenti franosi coinvolgono prevalentemente le spesse coltri detritiche. Frequentemente i depositi detritici presenti lungo i versanti finiscono per alimentare il trasporto solido dei torrenti. Quest'ultimi alla confluenza con il T. Turrice Cava formano conoidi di deiezione chiaramente visibili. Gli scivolamenti di roccia in blocco interessano vaste aree di versante intensamente fratturate e, spesso, sono favoriti da un assetto geologico-strutturale caratterizzato dalla sovrapposizione di rocce competenti su rocce a comportamento plastico.

Circa 250 frane sono state riconosciute e cartografate. Gli scivolamenti (rotazionali o traslativi) di terra o detrito costituiscono il 90% dei movimenti franosi, ricoprendo il 12% dell'intera area, mentre i crolli di roccia e gli scivolamenti di roccia in blocco sono scarsamente rappresentati. Le Deformazioni Gravitazionali Profonde di Versante (HUTCHINSON, 1988) descritte in tutta la valle centrale e superiore del Serchio (CAREDIO *et alii*, 1997; D'AMATO AVANZI & PUCCINELLI, 1997), interessano spesso, nell'area studiata, interi versanti.

CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E LITOLOGICO-TECNICHE

L'area investigata (Fig. 3) è caratterizzata dalla presenza delle formazioni della Falda Toscana (Calcare Selcifero di Limano, Calcari e Marne a Posidonia, Calcare Selcifero della Val di Lima, Diaspri, Maiolica, Scaglia Toscana, Calcareniti di Montegrossi, Macigno) e dai depositi quaternari.

Per ciascuna delle unità litostratigrafiche sopra citate viene riportata una breve descrizione delle principali caratteristiche litologico-tecniche (BIENIAWSKI, 1989; ISRM, 1978, 1981).

Calcare Selcifero di Limano (Pliensbachiano Sup.-Pliensbachiano Sup./Toarciano Inf.)

Il Calcare Selcifero di Limano è costituito da calcilutiti silicee e

bilità. Karst phenomena are also present and increase limestone degradation, mostly visible above 800 m of elevation. Thus, landslide movements highly dominate the landscape.

Several authors mapped and described the landslide characteristics and hazard in this territory (NARDI *et alii*, 1985, 1986, 2000; D'AMATO AVANZI *et alii*, 1993, 2000, and references therein). Rotational slide and slide-flow movements (CRUDEN & VARNES, 1996) are the most frequent types, involving shale and clay or sandy rocks (Scaglia toscana Fm. and Argille sabbie e conglomerati di Fornaci di Barga Fm.). Translational slides are also present, commonly in most competent rocks (limestone and sandstone) and in the slope deposits covering the Macigno. Different loose deposits are present along the slopes and play an important role for the active surface processes in the area. In particular landslides affect the slope cover. Locally, the debris supplies channelized debris flows, whose final accumulation lobes are clearly visible. Rock block slides involve wide areas, where competent rocks lay on soft rocks and several faults are present.

About 250 landslides were detected in the field and mapped in the landslide inventory map. Translational and rotational slides account for more than 90% of landslides, covering about 12 % of the study area. Few rock falls and rock block slides were also observed. Moreover, Deep Seated Gravitational Deformations (HUTCHINSON, 1988) are present and have been described in all the middle and upper Serchio Valley (CAREDIO *et alii*, 1997; D'AMATO AVANZI & PUCCINELLI, 1997): in the study area this kind of deformations often involve wide slope areas.

GEO-ENGINEERING FEATURES

In the study area (Fig. 3) most of the Tuscan Nappe crops out (Calcare Selcifero di Limano Fm., Calcari e Marne a Posidonia Fm., Calcare Selcifero della Val di Lima Fm., Diaspri Fm., Maiolica Fm., Scaglia Toscana Fm. and Calcareniti di Montegrossi Member, Macigno Fm.), together with Quaternary deposits.

For the considered units, typical lithostratigraphic and synthetic geo-engineering characteristics are briefly described as follows (BIENIAWSKI, 1989; ISRM, 1978, 1981).

Calcare Selcifero di Limano Fm. (upper Pliensbachian-upper Pliensbachian/lower Toarcian).

The Calcare Selcifero di Limano Fm. is a regularly stratified fine-

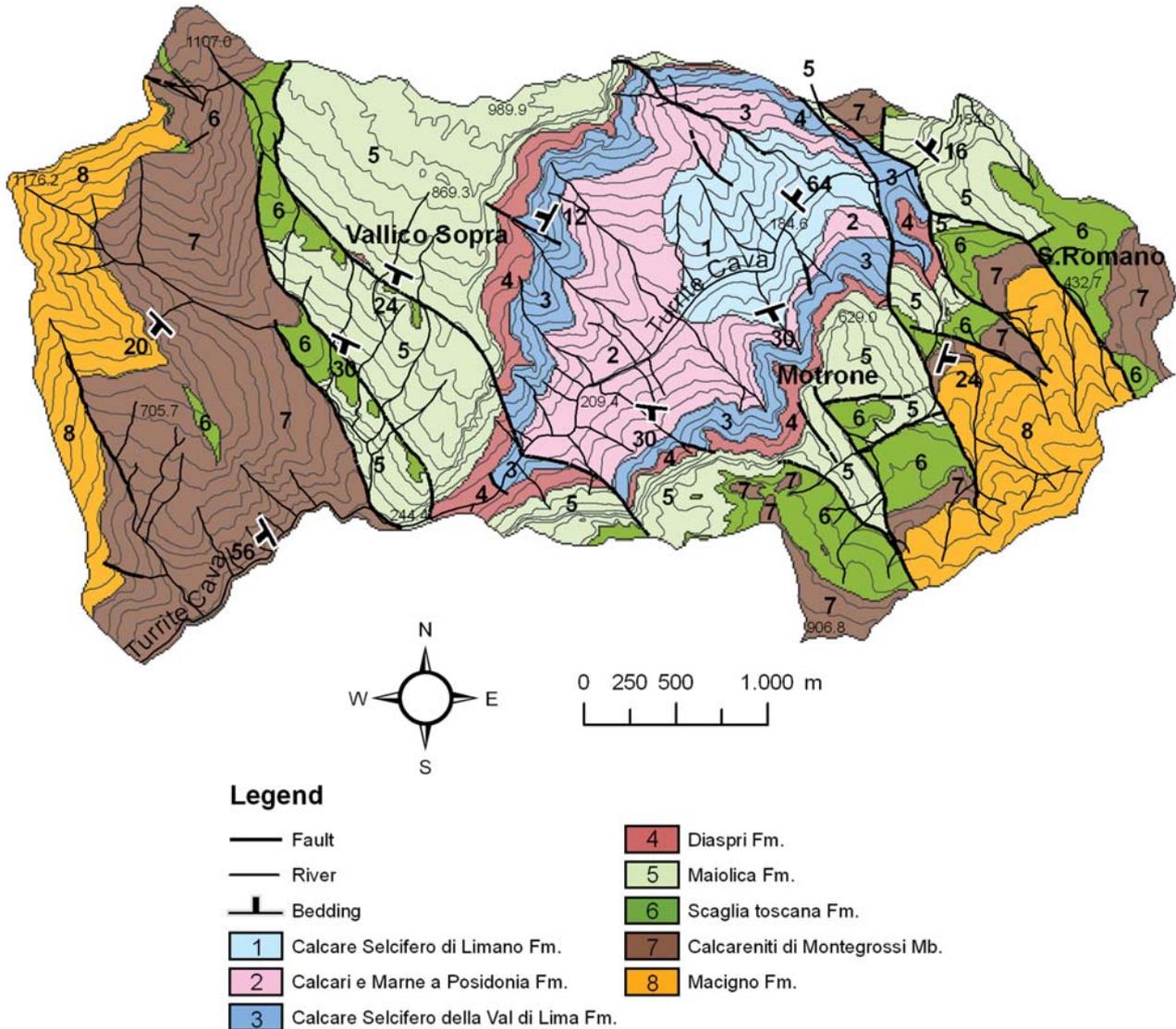


Fig. 3 - Carta geologica schematica dell'area di studio (NARDI *et alii*, 2000, modificata)
 - Geological sketch map of the study area (NARDI *et alii*, 2000, modified)

calcareniti fini, con liste e noduli di selce, a cui si intercalano strati sottili di marne e argilliti. La resistenza è variabile da molto resistente a resistente (UCS = 75 MPa). Presenta discontinuità con persistenza media, spaziatura fitta, leggermente aperte, rugose e frequentemente alterate. La qualità dell'ammasso può essere considerata buona (BRMR = 62).

Calcari e Marne a Posidonia (Pliensbachiano Sup./Toarciano Inf. - Bajociano Sup./Bathoniano Inf.)

I Calcari e Marne a Posidonia sono generalmente costituiti da marne e marne calcaree con intercalazioni di calcilutiti, calcareniti fini silicee e argilliti. La roccia presenta una resistenza variabile da

grained cherty limestone with interbeds of marl and shale. Strength of intact rock material is about 75 MPa. Spacing of discontinuities is close. Discontinuity persistence is medium. Joints are open, rough and highly weathered. The rock mass may be considered as a good rock (BRMR of about 62)

Calcari e Marne a Posidonia Fm. (upper Pliensbachian/lower Toarcian - upper Bajocian/lower Bathonian)

The Calcari e Marne a Posidonia Fm. is generally formed of stratified marl with intercalated limestone, calcarenite and shale. Strength of intact rock material is about 50 MPa. Spacing of discon-

resistente a mediamente resistente (UCS = 50 MPa). Le discontinuità hanno persistenza variabile da bassa a media, con spaziatura fitta e sono leggermente aperte, rugose e frequentemente alterate. La qualità dell'ammasso può essere considerata discreta (BRMR = 50).

Calcarea Selcifera della Val di Lima (Bajociano Sup./Batoniano Inf.-Titoniano Sup.)

Il Calcarea Selcifera della Val di Lima si presenta come calcareniti gradate e calcilutiti con abbondanti liste e noduli di selce. La roccia è resistente (UCS = 80 MPa). Presenta discontinuità con persistenza media, spaziatura moderata, leggermente aperte, rugose e lievemente alterate. La qualità dell'ammasso può essere considerata buona (BRMR = 65).

Diaspri (Bajociano Sup./Batoniano Inf.-Titoniano Sup.)

I Diaspri consistono in radiolariti e selci regolarmente stratificate con intercalazioni di argilliti e marne. La resistenza della roccia è variabile, da mediamente resistente a debole (UCS = 40 MPa). Le discontinuità hanno persistenza variabile da bassa a media e si presentano con una spaziatura molto fitta, leggermente aperte e molto alterate. La qualità dell'ammasso roccioso può essere considerata scadente-discreta (BRMR = 40).

Maiolica (Titoniano Sup.-Aptiano Inf.)

La Maiolica è formata da calcilutiti fini con intercalazioni di noduli e liste di selce. Sono presenti intercalazioni di calcareniti e calciruditi. La roccia è resistente (UCS = 80 MPa) ed interessata dalla presenza di due-tre sistemi di fratture con spaziatura fitta. Le discontinuità hanno persistenza variabile da alta a molto alta, sono chiuse o leggermente aperte, rugose o leggermente rugose, leggermente alterate e asciutte. La qualità dell'ammasso può essere considerata buona (BRMR = 60).

Scaglia toscana (Aptiano Inf.-Oligocene Sup.)

La Scaglia toscana è generalmente costituita da diverse litofacies e membri. Nell'area di studio sono presenti due litofacies, pelitica e calcareo-pelitica ed il membro delle Calcareniti di Montegrossi. La litofacies pelitica (prevalente) comprende argilliti varicolori con intercalazioni di calcilutiti e calcareniti. I livelli argillitici si presentano deboli (UCS stimato < 20 MPa). Le intercalazioni calcaree presentano resistenza media (UCS variabile: 40-50 MPa). La qualità globale dell'ammasso roccioso può considerarsi scadente-discreta (BRMR < 40).

Il membro calcarenitico-ruditico (Calcareniti di Montegrossi) è formato prevalentemente da calcareniti e calciruditi scarsamente stratificate. La roccia è resistente (UCS = 80 MPa), con spaziatura delle discontinuità variabile, da moderata a fitta. Le discontinuità presentano una persistenza elevata, sono aperte, rugose, lievemente alterate e asciutte, talvolta con riempimento sottile e di natura coesiva. La qualità dell'ammasso roccioso può essere considerata buona (BRMR = 65).

Macigno (Oligocene Sup.-Miocene Inf.)

Il Macigno è costituito generalmente da arenarie torbiditiche quarzoso-feldspatiche con sottili intercalazioni di siltiti e argilliti. La roccia presenta una resistenza media (UCS = 50 MPa). Le discontinuità presentano una spaziatura fitta, hanno persistenza variabile da

tinuità is close. Discontinuity persistence is variable from medium to low. Joints are partially open, with rough and highly weathered surfaces. The rock mass may be considered as a fair rock (BRMR of about 50).

Calcarea Selcifera della Val di Lima Fm. (upper Bajocian/lower Bathonian-upper Tithonian)

The Calcarea Selcifera della Val di Lima Fm. is formed of regularly stratified calcarenite and limestone with frequent interbeds of chert. Strength of intact rock material is about 80 MPa. Discontinuity persistence is medium, spacing is moderate. Joints are partially open, and surfaces are rough and slightly weathered. The rock mass may be considered as a good rock (BRMR of about 65).

Diaspri Fm. (upper Bajocian/upper Bathonian-upper Tithonian)

The Diaspri formation consists of regularly stratified radiolarite with intercalation of shale and marl. Strength of intact rock material is about 40 MPa. Spacing of discontinuities is very close. Discontinuity persistence is medium. Joints are open, and highly weathered. The rock mass may be considered as a poor rock (BRMR of about 40).

Maiolica Fm. (upper Tithonian-lower Aptian)

The Maiolica Fm. is regularly stratified and mainly formed of fine-grained limestone with interbeds of chert and intercalation of calcarenite and calcirudite. Strength of intact rock material is about 80 MPa. Joint spacing is close. Discontinuity persistence range from medium to high. Joints are tight and partially open, surfaces are rough or slightly rough, slightly weathered and dry. The rock mass may be considered as a fair rock (BRMR of about 60).

Scaglia toscana Fm. (lower Aptian-upper Oligocene)

The Scaglia toscana Fm. is generally formed of several lithofacies and members. In the study area, only the pelitic lithofacies and the Calcareniti di Montegrossi Mb. represent the formation. The pelitic lithofacies includes red, green or brown slaty mudstone and marly mudstone, with thin intercalations of calcilutite and calcarenite. Strength of Mudstone intervals was estimated at 20 MPa and less, while calcareous interbeds are about 40-50 MPa. The rock mass may be considered as a poor or very poor rock (BRMR less than 40).

The Calcareniti di Montegrossi Mb. is prevalently made of massive or roughly stratified calcarenite and calcirudite. Strength of intact rock material is about 80 MPa. Discontinuity spacing range between moderate and close, persistence is medium. Joints are open with very rough surfaces, slightly weathered and dry. Infilling may be frequent, thin and soft. The rock mass may be considered as a good rock (BRMR of about 65).

Macigno Fm. (upper Oligocene-lower Miocene)

The Macigno Fm. is mainly formed of medium and coarse quartzfeldspathic, turbidite sandstone, with minor interbeds of mudstone or siltstone. Strength of intact rock material is about 50 MPa. Discontinuity spacing is close. Persistence is high. Joints are open

bassa a media, sono aperte, leggermente lisce, talvolta intensamente alterate e umide. La qualità dell'ammasso roccioso può essere considerata discreta (BRMR = 55).

Lungo i versanti sono presenti spesse coltri detritiche poco addensate o sciolte. Si tratta di depositi con granulometria variabile, in prevalenza sabbiosi. I depositi situati in corrispondenza della Scaglia toscana hanno una granulometria più fine. Le coltri detritiche si presentano con spessori variabili, mediamente da 1 a 5 m e sono interessate da numerosi fenomeni franosi.

APPROCCIO METODOLOGICO

La valutazione della suscettibilità di frana e della pericolosità che ne deriva fanno riferimento ad una bagaglio di conoscenze piuttosto complesso e ad alcune assunzioni fondamentali, comunemente accettate dalla comunità scientifica (GUZZETTI *et alii*, 1999). Inoltre, tali valutazioni possono andare incontro a difficoltà concettuali ed operative legate al metodo utilizzato, alla scelta dell'unità di mappa più appropriata (CARRARA *et alii*, 1985) e alla scala di lavoro (CAMPUS *et alii*, 2005).

Le metodologie di valutazione della suscettibilità di frana si possono distinguere in metodi diretti e indiretti, qualitativi o quantitativi. I metodi diretti si basano sull'osservazione diretta della cartografia geologica e geomorfologica e sulle considerazioni qualitative derivate da tale analisi. I metodi indiretti comprendono i metodi euristici (index method), di tipo semi-quantitativo, i metodi statistici (analisi statistica bivariata e multivariata, reti neurali artificiali), i metodi deterministici o fisicamente basati e quelli probabilistici, tutti di tipo quantitativo (GUZZETTI *et alii*, 1999).

Tra i metodi indiretti, quelli statistici hanno il principale vantaggio di rendere possibile la valutazione quantitativa dell'importanza o peso statistico dei fattori che concorrono all'instabilità, con la possibilità di effettuare una selezione delle variabili in ingresso, in modo da ridurre i possibili errori di non corretta classificazione delle unità di mappa (MEIJERINK, 1988; CARRARA *et alii*, 1995a; 1995b). Inoltre, possono essere applicati piuttosto facilmente anche su vasta scala (AMANTI *et alii*, 1992; CARRARA *et alii*, 1985, 1990, 1991, 1992; CLERICI & DALL'OLIO, 1995; CLERICI *et alii*, 2002; FEDERICI *et alii*, 2005, 2006). Tuttavia, in accordo con GUZZETTI *et alii* (1999), trattandosi di un metodo di analisi di tipo data-driven, l'analisi statistica risulta strettamente legata alla quantità e qualità dei dati di ingresso e difficilmente può essere adattata a contesti geologici e geomorfologici molto differenti tra loro.

In questo lavoro le conoscenze concernenti l'uso delle tecniche statistiche finalizzate alla valutazione della suscettibilità di frana sono state integrate in un approccio multidisciplinare. I dati raccolti attraverso la caratterizzazione geomorfologica e litologico-tecnica sono stati organizzati ed analizzati in ambiente GIS in modo da ottenere livelli informativi georeferenziati ed analizzarne le reciproche relazioni con la distribuzione spaziale dei dissesti. Successivamente sono state applicate due distinte tecniche di analisi statistica attra-

and widely open, smooth or slightly rough, highly weathered. The rock mass may be considered as a fair rock (BRMR of about 55).

Different loose deposits are present along slopes. Grain size is variable but sandy deposits prevail. Deposits resulting from the argillitic Scaglia toscana Fm. are finer. Several mass movements involve the scree cover, 1-5 m thick.

METHODOLOGICAL APPROACH

The conceptual framework of landslide susceptibility and risk assessment constitutes a large and rather complex amount of knowledge about landslides, and is based on a few assumptions widely accepted by scientists (GUZZETTI *et alii*, 1999). Landslide susceptibility assessment could also face problems and difficulties due to both conceptual (CARRARA *et alii*, 1985) and operative constraints (CAMPUS *et alii*, 2005).

Techniques that aim at defining landslide susceptibility are divided into two basic categories: direct and indirect methods. Furthermore, they could be qualitative or quantitative. Direct approach is based on the ability of scientists to evaluate the potential slopes instability taking into account a great amount of instability factors and parameters derived from geological and geomorphological maps, or detected in the field. Drawbacks concern the high level of subjectivity of such investigation and its degree of uncertainty. Indirect methods could be either semi-quantitative (heuristic or index method) or quantitative (statistical, probabilistic and physically-based methods) (GUZZETTI *et alii*, 1999). The goodness of statistical methods relies on the capability of the model to evaluate the statistical weights and effectiveness of the instability factors in order to prevent increasing errors and meaningless classification of the terrain units (MEIJERINK, 1988; CARRARA *et alii*, 1995a; 1995b). Furthermore, they could also be suitable for wide scale assessment projects (AMANTI *et alii*, 1992; CARRARA *et alii*, 1985, 1990, 1991, 1992; CLERICI & DALL'OLIO, 1995; CLERICI *et alii*, 2002; FEDERICI *et alii*, 2005, 2006). Nevertheless, evaluations built up for one specific area cannot be easily extrapolated for too different test areas (GUZZETTI *et alii*, 1999).

In this paper a multidisciplinary approach was performed. Data derived from geological, geomorphological and geo-engineering characterization were converted into GIS-oriented layers and matched with the actual landslide distribution. Then two distinct statistical methods were applied in order to rank slope instability in some different degree.

The methodology proceeded step by step, as follows:

- geomorphologic investigation, in order to make a landslide inventory map and understand the relationship between geomorphological processes and instability;
- geo-engineering survey and characterization with in situ and labo-

verso cui è stato possibile giungere ad una zonazione dei versanti sulla base della loro suscettività a produrre fenomeni di instabilità.

Di seguito vengono riassunti i passi principali della metodologia di analisi proposta:

- rilevamento geomorfologico attraverso cui sono stati individuati e cartografati i dissesti, i principali processi morfogenetici e forme connessi con l'instabilità ed è stato inoltre possibile realizzare una carta inventario dei fenomeni franosi;
- indagini geomeccaniche: stazioni di rilevamento in situ dei parametri geomeccanici e prove sclerometriche effettuate con il martello di Schmidt, prove di laboratorio (Test Point Load ed analisi granulometriche);
- analisi spaziale attraverso strumenti GIS dei fattori dell'instabilità, rappresentati su carte tra loro sovrapponibili, o layers, in modo da poter valutare il concentrarsi in ogni punto dei fattori predisponenti in relazione alla distribuzione delle frane;
- analisi statistica dei dati (analisi bivariata e multivariata) con cui è stato possibile valutare in modo quantitativo l'influenza relativa di ciascun fattore predisponente nei confronti del verificarsi dei dissesti.

Il rilevamento geomorfologico, effettuato alla scala di 1.5 000, è stato arricchito attraverso il contributo dell'analisi foto-interpretativa. Per quanto riguarda i movimenti franosi, sono stati identificati e raccolti in un database i principali aspetti morfometrici, il tipo di movimento, lo stile e lo stato di attività, in accordo con la classificazione delle frane di CRUDEN & VARNES (1996), allo scopo di realizzare una carta inventario dei fenomeni franosi.

Le indagini di tipo geologico e litologico-tecnico hanno permesso di classificare e cartografare le rocce ed i terreni in base alle loro caratteristiche meccaniche. Le proprietà studiate riguardano, per le rocce, la resistenza a compressione uniassiale, la spaziatura e le condizioni delle discontinuità, mentre per le terre sono state considerate la tessitura, la consistenza e l'addensamento, la presenza di discontinuità. Sono stati eseguiti numerosi test in campagna (prove sclerometriche), ed in laboratorio (Test Point Load), insieme a prove manuali in campagna (ISRM, 1981) allo scopo di definire la resistenza a compressione uniassiale (UCS) delle rocce. Inoltre, sono stati adottati i sistemi di classificazione della qualità degli ammassi rocciosi di tipo RMR, Rock Mass Rating (BIENIAWSKI, 1989). Questo tipo di approccio considera alcuni parametri fisico-meccanici fondamentali: resistenza della roccia intatta, RQD (Rock Quality Designation), spaziatura delle discontinuità, condizioni delle discontinuità (persistenza, apertura, rugosità, riempimento, alterazione) condizioni idrauliche e orientazione delle discontinuità rispetto al pendio. In questo studio la qualità degli ammassi rocciosi è espressa come Basic RMR (BRMR) non considerando l'indice di correzione relativo ai rapporti geometrici tra le discontinuità ed il pendio.

Nell'area considerata sono presenti differenti unità litostratigrafiche, che, dal punto di vista delle caratteristiche fisico-meccaniche, possono essere considerate omogenee. Lo scopo della caratterizzazione

ratory tests (compression strength and grain size analysis), in order to analyze the physical and mechanical properties of rock and soil and link them to instability phenomena;

- organization of the spatial distribution of the considered factors in different layers, each related to a specific factor. The spatial overlay of the layers and their matching with the landslide distribution lead to connections between different types of instability factors and landslide occurrence;
- finally, GIS supported statistical analysis (spatial analysis, conditional and multivariate analysis) made it possible to supply the hypothetical connections with an objective and quantitative response.

Geomorphological mapping was performed on 1: 5 000 topographic map and improved with aerial photograph inspection. Landslide morphometry, types of movement, activity, and state and style of activity, according to CRUDEN & VARNES (1996), were recorded into a database in order to accomplish a landslide inventory map.

Geological and geo-engineering investigations were performed in order to classify and map rock mass and soil characteristics. Several properties were investigated: strength, spacing and conditions of discontinuities, for rocks; texture, consistency and the presence of discontinuities were considered for soils. Field tests (Schmidt Hammer) and laboratory tests (Point Load) together with field manual tests (ISRM, 1981) were collected in order to evaluate Unconfined Compressive Strength (UCS) of rocks. Otherwise, Rock Mass Rating (RMR) classification system (BIENIAWSKI, 1989) was considered in order to classify rock mass quality. This kind of approach follows the description and rating of some key parameter: intact rock strength, rock quality designation, spacing of discontinuities, conditions of discontinuities (persistence, separation, roughness, infilling, weathering) ground water conditions and discontinuities orientation vs. slope. Here, the rock mass quality is expressed as a Basic RMR (BRMR) value, without adjusting for the discontinuity orientation vs. slope.

Geo-engineering characterization was applied in order to improve the statistical significance of the lithological factor. In the study area, several lithostratigraphic units are present, which may be considered homogeneous as regards their physical and mechanical properties. However, detailed field investigation, together with laboratory tests, focused on the fact that only sometimes geo-engineering units agree with geological boundaries. Frequently geo-engineering units subdivide geological units in homogeneous subdomains, different for rock masses structure, strength or spacing of discontinuities. For example, the Scaglia toscana Formation consists of a prevalent pelitic and a calcareous-pelitic lithofacies, and the Calcareni di Montegrossi Mb., made of massive to roughly stratified and densely fractured calcarenite and calcirudite. Obviously, this variability imposed more detailed investigation. Moreover, several normal faults cross the study area, contributing

litologico-tecnica è quello di individuare le possibili affinità tra le caratteristiche litologiche e quelle meccaniche e, ove possibile, metterle in evidenza le differenze. Per fare un esempio, nella formazione della Scaglia toscana sono presenti una litofacies pelitica ed una calcareo-pelitica, un membro calcarenitico-ruditico costituito da calcareniti e calciruditi massive o grossolanamente stratificate, a luoghi fortemente fratturate; la notevole variabilità di questa formazione richiede una adeguata caratterizzazione litologico-tecnica. Inoltre la presenza di numerose faglie che attraversano l'area di studio contribuisce a peggiorare la qualità degli ammassi rocciosi, in alcuni casi già scadente.

La valutazione dell'instabilità dei versanti attraverso l'impiego di metodi di tipo statistico si basa su alcune assunzioni fondamentali di seguito riassunte: la presenza di un certo numero di fattori predisponenti al dissesto legati alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche, litologico-tecniche, climatiche, ritenuti connessi con il verificarsi dei dissesti e utilizzabili in un modello predittivo (DIETRICH *et alii*, 1995); l'instabilità passata e presente sono parametri chiave per la predizione dell'instabilità futura (VARNES *et alii*, 1984; CARRARA *et alii*, 1991; HUTCHINSON, 1995.); la frequenza o densità di dissesto in ciascuna unità di mappa, è assimilabile alla probabilità che una frana si verifichi in quell'area (MORGAN, 1968; FABBRIS, 1997).

La pericolosità di frana che ne deriva può essere studiata attraverso la scelta di un'unità di mappa appropriata e del metodo statistico. Nella prima fase di questo lavoro, è stata applicata l'analisi statistica condizionale alle Unità di Condizioni Uniche (UCU). La scelta delle Unità di Condizioni Uniche implica la classificazione di ciascun fattore predisponente in un numero limitato di classi rappresentate in una carta tematica o layer. La sovrapposizione dei diversi layer, ciascuno relativo ad un fattore dell'instabilità, conduce alla formazione di domini omogenei (UCU) caratterizzati da combinazioni uniche delle classi in cui i fattori sono stati suddivisi (HANSEN, 1984). L'operazione di riclassificazione e successiva codifica dei layer tematici è avvenuta previo confronto con la distribuzione dei dissesti e calcolo della frequenza di frana in ciascuna classe. Così, a ciascuna nuova classe viene attribuito un codice unico ed il relativo layer viene preparato per essere sovrapposto insieme agli altri. Quest'ultima operazione porta alla realizzazione della carta delle UCU il cui numero dipende dal criterio utilizzato nella riduzione in classi dei diversi fattori. Infine è stata calcolata la densità di frana in ciascuna UCU ed è stato effettuato un primo tentativo di valutazione del grado di propensione al dissesto del territorio applicando un algoritmo classificatorio alla distribuzione di frequenza delle frane in ciascuna unità. Questa tecnica, denominata natural breaks (JENKS, 1989), identifica le variazioni maggiormente significative di una distribuzione ordinata di dati. In questo modo è stato possibile definire cinque classi di instabilità crescente da molto bassa a molto alta.

Questo lavoro propone inoltre l'utilizzo di un modello di regressione multivariata appartenente ai Modelli Lineari Generalizzati (GLM). Inizialmente i GLM furono introdotti separatamente nella metodologia statistica per studiare situazioni reali per le quali il

in worsening rock mass quality.

Scientists do not usually agree about the role of factors causing instability phenomena. Nevertheless, the scientific community agree well on the fact that instability is due to the concurrence of several factors varying in type from geological, morphological, geo-engineering, to climatic ones.

Landslides hazard mapping using statistical methods is based on few basic assumptions resumed as follows: the presence of a set of instability factors believed in connection with instability and related to the geological, geomorphological, geo-engineering and climatic conditions, to be processed using predicting model of landslide occurrence (DIETRICH *et alii*, 1995); the past and present landslides distribution is the key parameter to predict landslide occurrence in the future (VARNES *et alii*, 1984; CARRARA *et alii*, 1991; HUTCHINSON, 1995); landslide frequency in each map unit, corresponding to landslide susceptibility (MORGAN, 1968; FABBRIS, 1997), is powerful in ranking slope instability. Assessing landslide susceptibility using probabilistic method implies the selection of method and map unit type. At first Conditional Analysis was applied and Unique Conditions Map Units were performed. Unique Condition Units (UCU) imply the classification of each slope instability factor into few significant classes, which are stored into a single map, or layer. By overlaying all layers, homogeneous domains (i.e. the UCUs) are singled out (HANSEN, 1984). Reclassification and synthesis of the instability factors into few significant classes is made up by matching each thematic layer with landslide distribution and evaluating the landslide frequency or density in each specific class. Each new class needs to be coded and the layer prepared to overlay with others. The last operation leads to the definition of the UCUs whose number and size depend on the criteria used in classifying the input factors. Finally, landslide frequency in each UCU was computed, and a first attempt to classify instability was obtained applying a classificatory algorithm to the distribution of landslide frequency in each UCU. This technique, named Jenks' algorithm (JENKS, 1989) identifies break points by picking the class that breaks the best group similar values and maximize the differences between classes, leading to the definition of five instability classes, ranked from very low to very high.

Moreover, multivariate regression analysis was performed. Regression analysis plays a central role in statistics, being one of its most powerful and commonly used techniques. The standard linear regression models assume that the response variable is normal (or at least can be transformed to a normal one). However, unfortunately it is not always the case. A wide variety of models with a categorical response is a typical (although not the only one!) example, where the assumption of normality cannot be accepted as reasonable. Using the Generalized Linear Model we approach data mining with an extension of the General Linear Model to include response variables that follow any probability distribution in the exponential family of distributions (McCULLAG & NELDER, 1983).

modello di regressione lineare classico non risultava adeguato. Infatti, in alcuni casi, ad esempio in presenza di dati binari o di conteggio, risulta necessario modellare la variabile osservata con variabili casuali di tipo discreto o comunque diverse dalla Normale. Attraverso l'utilizzo dei GLM, l'approccio all'analisi esplorativa dei dati avviene attraverso una particolare estensione dei modelli di regressione classici in cui le variabili casuali, quindi la variabile risposta, appartengono alla famiglia esponenziale (McCULLAG & NELDER, 1983).

Un GLM consiste di tre componenti:

- una componente casuale: Y_i , con $i = 1, \dots, n$ variabili casuali indipendenti, ognuna con distribuzione appartenente alla famiglia esponenziale;
- una funzione lineare chiamata, predittore lineare: $\eta_i = \alpha + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_k X_{ik}$ da cui dipendono i valori attesi μ_i di Y_i .
- una funzione legame $g(\mu_i) = \eta_i$, che trasforma il valore atteso della variabile risposta nel predittore lineare.

La regressione logistica è stata applicata per l'analisi di dati binari. Questa particolare tipologia di dati si presenta ogni volta che per ciascuna unità osservata la variabile risposta è dicotomica (zero - 1). Ciò che viene ricavato dal modello è π , la probabilità che la variabile risposta assuma una modalità piuttosto che un'altra (1 piuttosto che zero). La distribuzione di Y è assunta come binomiale. Il calcolo degli odds ($\pi / (1-\pi)$) per ciascun caso statistico può fornire una risposta immediata e di facile interpretazione di quante volte la probabilità che Y assuma il valore 1 è più grande o più piccola della probabilità che assuma la modalità opposta (valore zero).

RISULTATI

Ambedue i metodi di analisi statistica (analisi condizionale e multivariata) sono stati applicati al medesimo set di fattori predisponenti che si ipotizza siano in relazione con i fenomeni franosi. Ciascun fattore predisponente, o layer, forma una carta tematica. Ciascun layer è stato analizzato in relazione alla distribuzione spaziale dei fenomeni franosi, allo scopo di valutare l'importanza relativa di ciascuna classe.

La Tabella 1 mostra la lista dei fattori predisponenti presi in considerazione nelle analisi statistiche, riportando per ciascuno una breve descrizione e i codici identificativi.

Come descritto nel capitolo precedente, la scelta delle categorie e dei relativi codici identificativi è avvenuta confrontando ciascun layer relativo ai fattori predisponenti con la carta inventario dei fenomeni franosi e valutando la frequenza di frana in ciascuna classe o categoria. La numerosità delle categorie per ciascun layer non dovrebbe essere né troppo alta, con il rischio di incorrere in domini omogenei statisticamente poco significativi, né, all'opposto troppo bassa (CHUNG *et alii*, 1995). In alcuni casi è infatti possibile accorpare quelle classi che mostrano un'importanza relativa del tutto simile nei confronti dei dissesti (valori simili di frequenza di frana), in modo da ridurre il numero stesso delle categorie; in altri casi, l'as-

A generalized linear model consists of three components:

- a random component, specifying the conditional distribution of the response variable, Y_i , given the predictors. Traditionally, the random component is an exponential;
- a linear function of the regressors, called the linear predictor, $\eta_i = \alpha + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_k X_{ik}$ on which the expected value μ_i of Y_i depends. The X 's may include quantitative predictors, but they may also include transformations of predictors, polynomial terms, contrasts generated from factors, interaction regressors, etc;
- an invertible link function $g(\mu_i) = \eta_i$, which transforms the expectation of the response to the linear predictor.

Logistic regression is helpful for data given in the form of numbers of successes and trials at each of a number of levels of X (auxiliary variables). What is modelled is π (the probability of Y , or the mean of a zero-1 variable). The distribution of Y is assumed to be binomial.

Computation of $\pi / (1-\pi)$, called "odds" for the considered event, provides immediate and conceptually simple numeric response of how many times the probability of Y to assume the value 1 is greater or smaller than the probability to assume the value zero.

RESULTS

Both conditional and multivariate statistical techniques were applied to the same set of instability factors believed in connection with instability phenomena. Each factor forms a single GIS-oriented thematic map or layer. Each layer was analyzed and matched with the landslide distribution, in order to evaluate the relative influence of each layer class.

Table 1 shows the list of input factor considered in the statistical analysis, a brief explanation and their codification.

As explained previously, the choice of the number of categories for each instability factor and the related codes was performed by overlaying each layer with the landslide inventory map and evaluating the landslide frequency in each class.

A large number of categories within a specific layer can give troubles due to the presence of meaningless statistics; this could happen even though the number of categories is too low (CHUNG *et alii*, 1995). Attempt to reduce the number of categories within a thematic layer could be conceptually correct when the categories to be combined show similar landslide frequency values. Sometimes, the geomorphological and structural settings of the investigated field, can affect the variability within a specific layer, often reducing the number of categories.

APPROCCIO STATISTICO E TECNICHE GIS PER LA VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ DI FRANA IN UN'AREA CAMPIONE
DELLA VALLE DEL SERCHIO (ITALIA)

Input Factor	Explanation	Variable	Id. Code
Geo-engineering characterization	Prevalent argillitic rock (Scaglia toscana Fm.: pelitic and calcareous-pelitic lithofacies), weathered and fractured Calcareniti di Montegrossi Mb.	GE7	700 000
		GE6	700 000
		GE5	700 000
		GE4	700 000
	GE3	300 000	
	Prevalent calcarenite and sandstone with interbedded siltstone (Calcareniti di Montegrossi Mb., Macigno Fm.), weathered and fractured Diaspri Fm.	GE2	200 000
	Prevalent limestone and calcarenite (Maiolica Fm., Calcare selcifero della Val di Lima Fm., Calcare selcifero di Limano Fm., Calcareniti di Montegrossi Mb., Calcari e Marne a Posidonia Fm.), together with the unweathered Macigno Fm.	GE1	100 000
Landcover	Degraded wood	LC1	10 000
	Wood	LC2	20 000
Distance from tectonic elements	0-250 m	D1	1 000
	> 250 m	DF2	2 000
Distance from rivers	0-200 m	DR1	100
	200-400 m	DR2	200
	> 400 m	DR3	300
Slope gradient	0°-25°	S1	10
	25°-50°	S2	20
	> 50°	S3	30
Aspect	North (0° - 22.5°; 337.5° - 360°) North-East (22.5° - 67.5°), East (67.5° - 112.5°)	A1	1
	South-East (112.5° - 157.5°), South (157.5° - 202.5°), South-West (202.5° - 247.5°), West (247.5° - 292.5°), North-West (292.5° - 337.5°)	A2	2

Tab. 1 - Lista dei fattori predisponenti, loro descrizione e codifica
- *List of instability factors, explanation and identification code*

setto geomorfologico peculiare dell'area di studio può influenzare il dato di partenza, talvolta riducendone la variabilità. Difatti, nel caso di studio presentato, l'assetto morfostrutturale e la disposizione del pattern idrografico fanno sì che il fattore predisponente riguardante l'esposizione dei versanti acquisisca una limitata variabilità che può essere descritta utilizzando due sole categorie.

Dalla sovrapposizione spaziale delle sei carte tematiche elencate precedentemente, sono state ottenute le unità di mappa per l'area di studio. Delle 504 possibili UCU ne sono risultate 141, a causa della correlazione spaziale delle variabili in gioco. Quindi è stato effettuato un primo tentativo di classificare le unità di mappa in relazione al grado in instabilità, analizzando la distribuzione della densità di dissesto in ciascuna UCU (Fig. 4) ed ottenendo cinque classi di instabilità crescente, da molto bassa a molto alta (Fig. 5).

Affinché il modello di regressione multivariata potesse essere applicato in modo corretto, ciascuna UCU è stata codificata in unità "stabile" o "instabile" usando variabili di tipo dummy (zero - 1). Il valore soglia che discrimina tra le UCU stabili e quelle instabili si riferisce alla densità di dissesto media nell'intera area, pari a circa il 12%. Il modello di regressione logistica è stato applicato allo scopo di ottenere la predizione di appartenenza di ciascuna UCU ad uno dei due gruppi stabiliti a priori, utilizzando 19 variabili dummy precedentemente elencate (Tab. 1) e di verificare la percentuale di successi del metodo.

I risultati della classificazione sono mostrati nelle tabelle 2 e 3. Sono state calcolate le stime dei coefficienti ed i relativi standard error,

Actually, as it happened in this work, the peculiar geomorphological setting and hydrographical pattern are responsible for the low variability (only two categories) that characterized the slope aspect.

By overlaying the six thematic maps previously listed, mapping units for the analysis were obtained; because the thematic variables are spatially correlated, of the 504 possible unique conditions only 141 actually resulted. Then a first attempt to classify instability was obtained ranking the distribution of landslide frequency of each UCU (Fig. 4) into five susceptibility levels as shown in the map of figure 5.

In order to apply multivariate regression model the entire dataset were codified. Each unique condition was classified as stable or unstable using a dummy variable (zero-1) depending on the percentage of area affected by landslide deposit. The threshold was selected equal to the mean landslide area of the whole territory (landslide density in the study area is about 12%). Logistic regression was applied to predict stable and unstable Unique Conditions Units using 19 dummy variables corresponding to the classes into which the six input thematic maps were grouped (Table 1). Finally, the prediction power of the model was calculated.

Results of the classification are shown in table 2 and 3. For each variables entered into the model, the estimated coefficients, standard errors, and statistical significance, $\Pr(>|z|)=p$ -value, were calculated. Likelihood-ratio test was also applied in order to calculate

STATISTICAL APPROACH AND GIS TECHNIQUES IN EVALUATING LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY IN A SAMPLE AREA OF THE SERCHIO RIVER BASIN (ITALY)

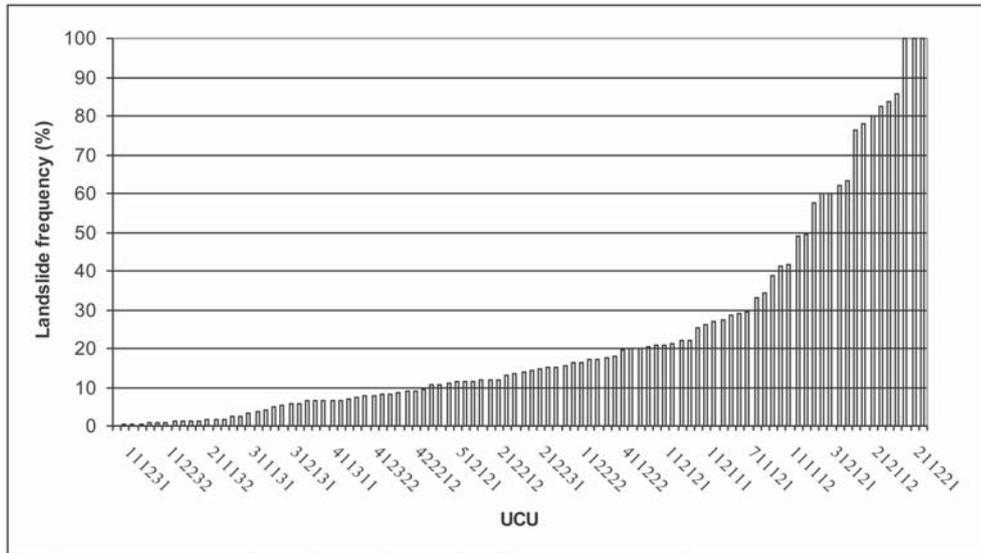


Fig. 4 - Frequenza di frana in ciascuna UCU. (Numero di categorie tra le etichette: cinque. Le UCU con frequenza pari a 0% sono state omesse)
 - *Landslide frequency vs. UCU identification code. (Number of categories between labels: five. UCUs with frequency = 0% were omitted)*

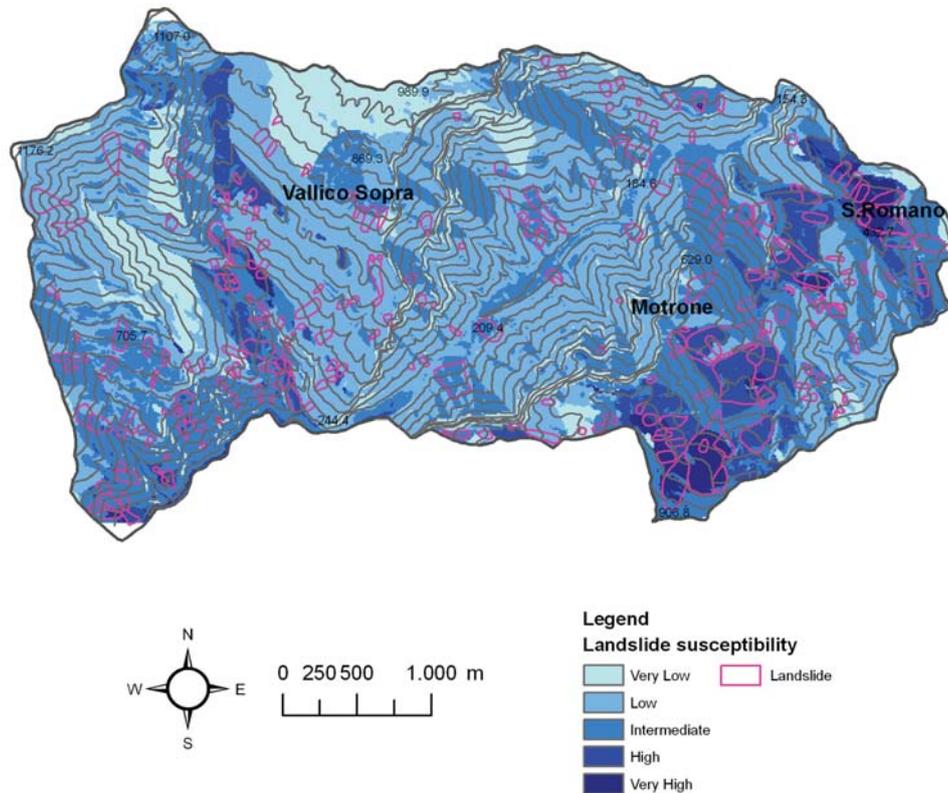


Fig. 5 - Carta dell'instabilità potenziale dei versanti ottenuta attraverso l'Analisi Condizionale. Classi di instabilità: (1) 0% - 4% (Molto Bassa); (2) 4% - 9% (Bassa); (3) 9% - 22% (Intermedia); (4) 22% - 41% (Alta); (5) >41% (Molto Alta). Densità di dissesto media nell'intera area = 12%
 - *Landslide susceptibility assessment by means of conditional analysis. Susceptibility levels are: (1) 0% - 4% (Very Low); (2) 4% - 9% (Low); (3) 9% - 22% (Intermediate); (4) 22% - 41% (High); (5) >41% (Very High). Landslide density in the study area is about 12%*

Variables	Coeff.	Std. Err.	Z value	Pr (> z)
GE2	1.311	0.827	1.573	1.573
GE3	3.901	0.949	4.099	0.000
GE4	1.880	0.763	2.455	0.014
GE5	2.016	0.939	2.138	0.032
GE6	4.237	5.066	0.836	0.991
GE7	1.444	1.345	1.064	0.287
LC2	-0.660	0.758	-0.878	-0.878
DF2	-1.480	0.515	-2.856	0.004
DR2	-1.361	0.513	-2.635	0.008
DR3	-5.184	1.303	-3.970	0.000
S2	-0.624	0.499	-1.244	0.213
S3	-3.519	0.968	-3.625	0.000
A2	0.021	0.473	0.473	0.958
Intercept	-0.004	0.749	-0.006	0.994

Likelihood-ratio Test: LR $\chi^2(13) = 73.18$; Prob > $\chi^2 = 0.000$ (p-value)

Tab. 2 - Lista delle variabili dummy introdotte nel modello di regressione logistica, coefficienti stimati, standard error (S.E.), significatività, Likelihood-ratio test e p-value
 - List of dummy variables entered into the logistic regression model, equation coefficient, standard errors (S.E.), statistical significance, Likelihood-ratio test and p-value

nonché la significatività statistica $\Pr(>|z|) = (p\text{-value})$ di ciascuna variabile introdotta nel modello. Inoltre è stato applicato il Likelihood-ratio test al fine di valutare la significatività del modello: il valore assunto è di 73.18 e risulta significativo in quanto il relativo p-value è 0.000. Tuttavia, il modello di regressione proposto costituisce un approccio preliminare che pertanto necessita di più approfonditi test di significatività statistica e di validità per essere utilizzato in fase previsionale.

A differenza dell'analisi stepwise, in cui è possibile introdurre nel modello una variabile alla volta e valutarne il relativo contributo parziale, con la possibilità di escludere le variabili poco significative, in questo studio sono state introdotte tutte le variabili considerate. Il calcolo del valore di $\pi = \Pr(Y=1|X)$, ovvero la probabilità che la variabile risposta Y assuma la modalità 1 (UCU instabile) date le covariate, è stato effettuato secondo la funzione del modello logit (regressione logistica) (PICCOLO, 2000):

da cui, introducendo le variabili ed i coefficienti stimati, risulta:

$$Y = \Pr(Y = 1) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n}}$$

Tra le variabili introdotte nel modello di Regressione Logistica

$$Y = \Pr(Y = 1) = \frac{e^{-0.004 + 1.311(GE2) + 3.901(GE3) + \dots + 1.444(GE7) - 0.660(LC2) - 1.480(DF2) - 1.361(DR2) - 5.184(DR3) - 0.624(S2) - 3.519(S3) + 0.021(A2)}}{1 + e^{-0.004 + 1.311(GE2) + 3.901(GE3) + \dots + 1.444(GE7) - 0.660(LC2) - 1.480(DF2) - 1.361(DR2) - 5.184(DR3) - 0.624(S2) - 3.519(S3) + 0.021(A2)}}$$

quelle relative alle caratteristiche litologico-tecniche delle formazioni (sette) sono le più importanti nel determinare l'appartenenza delle UCU al gruppo "stabili" o "instabili", insieme alle variabili che identificano l'acclività (tre), la distanza dai corsi d'acqua (tre) e la distanza dagli elementi tettonici (due), con una percentuale di successi pari a circa l'82% dei casi statistici (Tab. 3). Di contro la variabile legata

the goodness of the logistic regression analysis (LR-test = 73.18; p-value = 0.000). Nevertheless, the proposed regression model represent a preliminary approach that needs of further investigations to be used for forecasting.

The logistic regression model proceeded entering all the variables into the model, and π (the probability of Y) was computed using the logit function (PICCOLO, 2000):

to be filled with variables and coefficients, as follows:

Among the variables entered into Logistic Regression model,

those reflecting rock type (seven) are the most suitable ones in differentiated an "unstable" from a "stable" unit, together with slope gradient (three), distance from rivers (three) and distance from tectonic elements (two), with a success near to 82% (Tab. 3). Conversely, landcover proved to be rather poor predictor of landslide distribution, because more than 80% of the investigated area

STATISTICAL APPROACH AND GIS TECHNIQUES IN EVALUATING LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY IN A SAMPLE AREA OF THE SERCHIO RIVER BASIN (ITALY)

Actual group	A-priori membership, resulted from conditional analysis (N° of UCU)	Predicted membership, resulted from logistic regression analysis (N° of UCU)	
		Group 1 (stable units)	Group 2 (unstable units)
Group 1 (stable units)	87	76	11
Group 2 (unstable units)	54	15	39

Tab. 3 - Risultato della classificazione delle unità di condizioni uniche in unità instabili e stabili attraverso l'applicazione del modello di regressione logistica. Unità di condizioni uniche correttamente classificate: 81.5%
 - Prediction of stable and unstable unique-conditions units by means of logistic regression. Unique condition units correctly classified: 81.5%

alla copertura del suolo ha dimostrato uno scarso potere predittivo nei confronti dell'instabilità. Questo può essere attribuito al fatto che circa l'80% dell'area di studio è coperta da bosco e questa scarsa variabilità rende necessari ulteriori approfondimenti.

La distribuzione di probabilità di occorrenza di frana, predetta dal modello multivariato per ciascuna unità è stata analizzata attraverso l'algoritmo di Jenks (JENKS, 1989) in modo da individuare cinque intervalli o classi di suscettibilità di frana, come riportato nella figura 6.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

is covered by wood.

The probabilities of landslide occurrence predicted by logistic regression, were analysed by means of Jenks algorithm and grouped into five classes, as displayed in figure 6.

FINAL CONSIDERATIONS

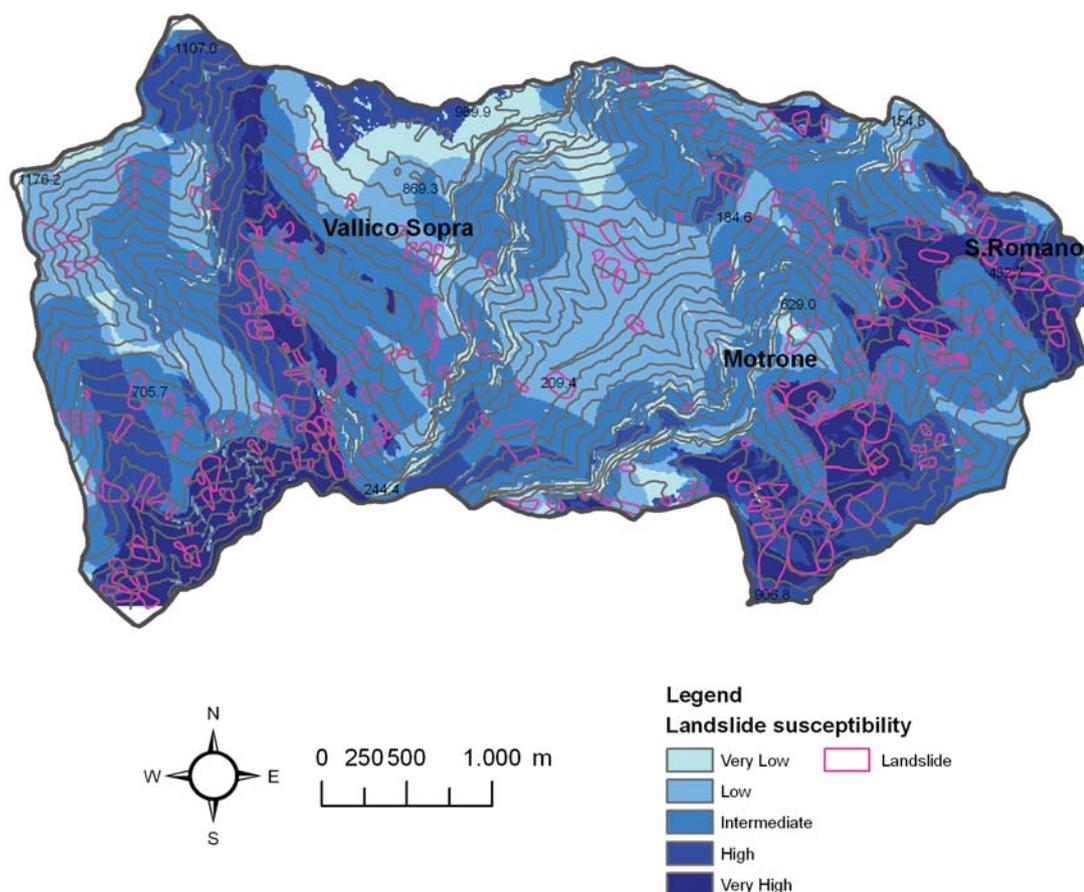


Fig. 6 - Carta dell'instabilità potenziale dei versanti ottenuta attraverso il modello di Regressione Logistica. Classi di instabilità (probabilità di appartenenza ai gruppi): (1) 0-0.05 (Molto Bassa); (2) 0.05-0.25 (Bassa); (3) 0.25-0.50 (Intermedia); (4) 0.50-0.80 (Alta); (5) >0.80 (Molto Alta)
 - Landslide susceptibility assessment by means of logistic regression. Susceptibility levels (probability of membership) are: (1) 0-0.05 (Very Low); (2) 0.05-0.25 (Low); (3) 0.25-0.50 (Intermediate); (4) 0.50-0.80 (High); (5) >0.80 (Very High)

La valutazione della suscettibilità di frana o pericolosità relativa dipende da molte cause e può essere condizionata da diversi fattori. Questo lavoro vuol essere un contributo alle conoscenze attuali sull'argomento, nel territorio della Toscana Settentrionale, attraverso l'applicazione di un metodo d'indagine che evolve attraverso metodologie statistiche di tipo indiretto e quantitativo. Inoltre l'utilizzo di tecniche GIS ha reso possibile l'organizzazione logica e l'archiviazione dei dati di tipo geologico, geomorfologico e litologico-tecnico e la loro preparazione e codifica per le analisi successive.

Attraverso l'analisi condizionale, i fattori di propensione al dissesto sono stati analizzati individualmente in relazione alla distribuzione dei dissesti. Il metodo risulta concettualmente semplice e richiede elaborazioni numeriche non onerose. Inoltre le unità di condizioni uniche riflettono piuttosto bene le caratteristiche geologiche e geomorfologiche dell'area in esame. Alcuni svantaggi risiedono nell'impossibilità di valutare l'influenza o peso statistico di ciascun fattore predisponente, che risulta quindi analizzato individualmente.

Al contrario, nell'analisi di Regressione Logistica ciascun fattore è confrontato con tutti gli altri in relazione alla distribuzione dei dissesti: in questo modo, la valutazione quantitativa dell'importanza relativa di ciascun fattore si riflette in una maggiore oggettività nella classificazione delle unità di condizioni uniche.

Il risultato di questo approccio multidisciplinare è una classificazione del territorio in aree con diverso grado di propensione al dissesto. Il modello multivariato di Regressione Logistica, valutando le reciproche strutture di relazione tra le variabili, fornisce un dettaglio maggiore in aree complesse. Il confronto dei risultati con la realtà geomorfologica e le caratteristiche legate all'instabilità dei versanti ha mostrato un buon grado di correlazione, sebbene la ricerca sia tuttora in fase sperimentale e necessita di approfondimenti utili alla comprensione dei vantaggi e delle limitazioni di questo approccio metodologico.

E' intenzione degli autori ricordare che il lavoro presentato, seppur metodologicamente conforme ai lavori presenti nella letteratura tecnica concernente la valutazione della suscettibilità di frana attraverso l'analisi multivariata e l'uso del GIS, costituisce un approccio sperimentale di tipo preliminare che necessita di approfondimenti in fase di training e di ulteriori test di validità dei risultati ottenuti affinché possa essere applicato a scopo previsionale.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano i due revisori anonimi, i cui commenti e suggerimenti hanno contribuito significativamente a migliorare il manoscritto.

OPERE CITATE - REFERENCES

- AMANTI M., CARRARA A., CASTALDO G., COLOSIMO P., GISOTTI G., GOVI M., MARCHIONNA G., NARDI R., PANIZZA M., PECCI M. & VIANELLO G. (1992) - *Linee guida per la realizzazione di una cartografia della pericolosità geologica connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti alla scala 1:50.000*. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Servizio Geologico, pp. 53.
- AYALEW L. & YAMAGISHI H. (2004) - *The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central*

Landslide susceptibility and relative hazard depend on several causes and are affected by many factors. This work improved the current knowledge on this item in Northern Tuscany, using a statistical approach that took advantage from a conditional and multivariate analyses. Moreover, GIS techniques made it possible to collect and process data from geological, geomorphological and geotechnical survey and prepare them for statistical analysis.

By applying conditional analysis, the instability factors were individually analyzed, connected to landslide occurrence and matched with landslide distribution. Conceptual simplicity and easy numeric computation mark this statistical method. Moreover, UCUs reflect geomorphological and geological differences rather well. Some drawbacks are the impossibility to give statistic weights to the instability factors that are individually evaluated. On the contrary, in the multivariate regression analysis each factor of instability was compared with the others in relation to the landslide occurrence; in this way, a more objective classification of the map units was done.

The outcome of this multidisciplinary approach is a classification of the land surface in some different landslide susceptibility classes. Multivariate regression model better highlights the relationship existing between instability factors, and gives more detailed picture in complex areas. The comparison of the results with the real geomorphological and stability characteristics showed a good fitting, although the research is still in progress and needs further investigations to understand advantages and limitations of this methodological approach.

The authors' purpose is to remind that the proposed experimental regression model aimed to the landslide susceptibility evaluation, though according to the technical literature concerning the subject, represent a preliminary version that needs deepening investigations to be applied for forecasting.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to two anonymous reviewers, whose comments and suggestions significantly improved the manuscript.

STATISTICAL APPROACH AND GIS TECHNIQUES IN EVALUATING LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY IN A SAMPLE AREA OF THE SERCHIO RIVER BASIN (ITALY)

- Japan. *Geomorphology* 65, 15-31.
- BALDACCI F., ELTER P., GIANNINI E., GIGLIA G., LAZZAROTTO A., NARDI R. & TONGIORGI M. (1967) - *Nuove osservazioni sul problema della Falda Toscana e sull'interpretazione dei flysch arenacei tipo «macigno» dell'Appennino Settentrionale*. Memorie Società Geologica Italiana 6: 213-244.
- BALDACCI F., CECCHINI S., LOPANE G. & RAGGI G. (1993) - *Le risorse idriche del Fiume Serchio e il loro contributo all'alimentazione dei bacini idrografici adiacenti*. Memorie Società Geologica Italiana 49: 365-391.
- BIENIAWSKI Z. T. (1989) - *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, 251 pp.
- CAMPUS S., FORLATI F. & NICOLÒ G. (2005) - *Note illustrative della Carta della pericolosità per instabilità dei versanti alla scala 1: 50 000*. ARPA Piemonte, 234 pp.
- CAREDDIO F., CASTALDINI D. & PUCCINELLI A. (1997) - *Gravitational slope deformations near the Abetone pass (Tuscan-Emilian Apennines)*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 19: 287-296.
- CARRARA A. (1983) - *Multivariate models for landslide hazard evaluation*. Mathematical Geology, 15: 403-426.
- CARRARA A., AGNESI V., MACALUSO T., MONTELEONE S., PIPITONE G., REALI C. & SORRISO-VALVO M. (1985) - *Modelli matematici per la valutazione della pericolosità connessa con i fenomeni di instabilità dei versanti*. Geologia Applicata e Idrogeologia 10: 63-91.
- CARRARA A., CARDINALI M., DETTI R., GUZZETTI F., PASQUI V. & REICHENBACH P. (1990) - *Geographical Information Systems and multivariate models in landslide hazard evaluation*. In: CANCELLI A. (1990, Ed.) - *Alps 90. Proceedings of 6th International Conference and Field Workshop on Landslides*. Milano, 17-28.
- 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 Landforms 16: 427-445.
- CARRARA A., CARDINALI M. & GUZZETTI F. (1992) - *Uncertainty in assessing landslide hazard and risk*. ITC Journal 2: 172-183.
- CARRARA A., CARDINALI M., GUZZETTI F. & REICHENBACH P. (1995a) - *GIS technology in mapping landslide hazard*. In: CARRARA A. & GUZZETTI F. (1995, eds.) - *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Publisher, Dordrecht, the Netherlands, 135-175.
- CARRARA A., CARDINALI M., GUZZETTI F. & REICHENBACH P. (1995b) - *GIS-based techniques for mapping landslide hazard*. <http://deis158.deis.unibo.it>.
- CHUNG CH.F. & FABBRI A.G. (1995) - *Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation*. In: CARRARA A., GUZZETTI F. (1995, eds.) - *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Publisher, Dordrecht, the Netherlands, 107-142.
- CLERICI A. & DALL'OLIO N. (1995) - *La realizzazione di una Carta della stabilità potenziale dei versanti mediante tecniche di analisi statistica multivariata e un sistema di informazione geografica*. Geologia Tecnica e Ambientale, 4: 49-57.
- CLERICI A., PEREGO S., TELLINI C. & VESCOVI P. (2002) - *Il sistema Informativo Territoriale delle frane della Val Parma: modalità costruttive, caratteristiche ed esempi di utilizzo*. Geologia Tecnica e Ambientale, 2: 21-40.
- CNR-REGIONE TOSCANA (1986) - *Progetto terremoto in Garfagnana e Lunigiana*. In: CNR-GNDT, REGIONE TOSCANA (1986, eds.). La Mandragora, Firenze, 239 pp.
- CRUDEN D.M. & VARNES D., J. (1996) - *Landslides types and processes*. In: TURNER A., K. SCHUSTER R., L. (1996, eds.) - *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington D.C., 36-75.
- D'AMATO AVANZI G. & PUCCINELLI A. (1997) - *Deep-seated gravitational slope deformations in north-western Tuscany (Italy): remarks on typology, distribution and tectonic connections*. Geografia Fisica Dinamica Quaternaria 19: 325-334.
- D'AMATO AVANZI G., PUCCINELLI A. & TRIVELLINI M. (1993) - *Slope stability maps in areas of particular seismic interest: a short report on the researches in Garfagnana and Lunigiana (Tuscany)*. Annali Geofisica 36, 1: 263-270.
- D'AMATO AVANZI G., PUCCINELLI A. & VERANI M. (2000) - *Progress in methods in the studies on slope instability in North-Western Tuscany*. Atti Società Toscana Scienze Naturali, Memorie Serie A 107: 115-123.
- DIETRICH E.W., REISS R., HSU M.-L. & MONTGOMERY D.R. (1995) - *A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data*. Hydrological Process 9: 383-400.
- FABBRIS L. (1997) - *Statistica multivariata. Analisi esplorativa dei dati*. McGraw-Hill, 437 pp.
- FEDERICI P.R., PUCCINELLI A., CANTARELLI E., CASAROSA N., D'AMATO AVANZI G., FALASCHI F., GIANNECCHINI R., POCHINI A., RIBOLINI A., BOTTAI M., SALVATI N. & TESTI C. (2007) - *Multidisciplinary investigations in evaluating landslide hazard. An example in the Serchio River valley (Italy)*. Quaternary International 171-172: 52-63.
- FEDERICI P.R., PUCCINELLI A., CANTARELLI E., CASAROSA N., D'AMATO AVANZI G., FALASCHI F., GIANNECCHINI R., POCHINI A., RIBOLINI A., BOTTAI M., SALVATI N. & TESTI C. (2005) - *Uso di tecniche GIS nella valutazione della pericolosità di frana nella valle del Serchio (Lu)*. Atti 9a Conferenza Nazionale ASITA, 2: 1059-1064.
- FEDERICI P. R. & RAU A. (1980) - *Note illustrative della neotettonica del Fogli 96 Massa*. Progetto Finalizzato Geodinamica, Contributi Preliminari Realizzazione Carta Neotettonica d'Italia 356: 1365-1382.
- HANSEN A. (1984) - *Landslide hazard analysis*. In: Brunsten D., Prior D.B. (1984, eds.) - *Slope Instability*. Wiley and Sons, 523-602.
- HUTCHINSON J.N. (1988) - *Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Losanna 1 3-35.

APPROCCIO STATISTICO E TECNICHE GIS PER LA VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ DI FRANA IN UN'AREA CAMPIONE
DELLA VALLE DEL SERCHIO (ITALIA)

- HUTCHINSON J.N. (1995) - *Keynote paper: landslide hazard assessment*. In: BELL (1995, Ed.) - *Landslides*. Balkema, Rotterdam, 1805-1841.
- ISRM (1978) - *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **15**: 319-368.
- ISRM (1981) - *Rock Characterization, Testing and Monitoring: Suggested methods*. Pergamon Press.
- JENKS G. F. (1989) - *Geographic logic in line generalization*. Cartographica **26**(1) 27-42.
- MARK R.K. & ELLEN S.D. (1995) - *Statistical ansimulation models for mapping debris flow hazard*. In: CARRARA A., GUZZETTI F. (1995, eds.) - *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Publisher, Dordrecht, the Netherlands: 135-175.
- MCCULLAG P. & NELDER J.A. (1983) - *Monographs on Statistics and Applied Probability* 37. Chapman & Hall, London.
- MEIJERINK A.M.J. (1988) - *Data acquisition and data capture through terrain mapping unit*. ITC Journal 1: 23-44.
- MORGAN B.W. (1968) - *An introduction to Bayesian statistical decision processes*. Prentice Hall, New York.
- NARDI R., POCHINI A., PUCCINELLI A., D'AMATO AVANZI G. & TRIVELLINI M. (1986) - *Valutazione del rischio da frana in Garfagnana e nella Media Valle del Serchio (Lucca). Carta geologica e carta della franosità degli elementi «Gragnana», «Piazza al Serchio», «Casciana» e «Ceserana» (scala 1:10 000)*. Bollettino Società Geologica Italiana **104**: 585-599.
- NARDI R., PUCCINELLI A., D'AMATO AVANZI G. & TRIVELLINI M. (1987) - *Valutazione del rischio da frana in Garfagnana e nella Media Valle del Serchio (Lucca). Carta geologica e carta della franosità degli elementi «Sillico», «Castelnuovo Garfagnana», «Cascio», «Castelvecchio Pascoli », «Gallicano », «Barga», «Fornaci di Barga» e «Ghivizzano» (scala 1:10 000)*. Bollettino Società Geologica Italiana **106**: 819-832.
- NARDI R., PUCCINELLI A. & D'AMATO AVANZI G. (2000) - *Carta della franosità del bacino del Fiume Serchio*. Autorità di Bacino del Fiume Serchio, Lucca, <http://www.serchio-autoritadibacino.it/cartto/index.html>.
- PERILLI N., PUCCINELLI A., SARTI G. & D'AMATO AVANZI G. (2004) - *Lithostratigraphy of the Plio-Pleistocene continental deposits of the Barga and Castelnuovo Garfagnana tectonic depressions*. In: MORINI, D., BRUNI, P. (2004, eds.) - *The Regione Toscana project of geological mapping. Case histories and data acquisition*. Regione Toscana, Special Volume for the 32th IGC Congress, Florence, 121-132.
- PICCOLO D. (2000) - *Statistica*. Edizioni Il Mulino, 969 pp.
- VARNES D.J. & IAEG COMMISSION ON LANDSLIDES (1984) - *Landslides Hazard Zonation – a review of principles and practice*. UNESCO, Paris.

Received May 2006 - Accepted January 2008