

## ANALISI DELLE INTERAZIONI TRA DINAMICA FLUVIALE E STABILITÀ DEI VERSANTI: L'ESEMPIO DELLA VAL TREBBIA (PC, NORD ITALIA)

### STUDY OF THE INTERACTIONS BETWEEN RIVERS DYNAMIC AND SLOPE STABILITY: A CASE IN VAL TREBBIA (NORTHERN ITALY)

LAURA SCESI(\*) & PAOLA GATTINONI(\*)

(\*) Politecnico di Milano- D.I.I.A.R. - Piazza Leonardo da Vinci, 32 - 20133 Milano, Italia. Tel ++39 (2) 23996665/2  
e-mail: laura.scesi@polimi.it; paola.gattinoni@polimi.it

#### RIASSUNTO

La nota propone una metodologia per la valutazione della pericolosità da frane di versante indotte dalla dinamica fluviale, sulla base di condizioni geologiche e idrauliche riconosciute come critiche. A titolo di esempio, lo studio è applicato alla media Val Trebbia (PC, Nord Italia), dove i versanti sono caratterizzati da numerosi fenomeni di instabilità e il Fiume Trebbia, spesso intrecciato, è incassato in "rocce deboli" (OLIVEIRA, 1990).

Dapprima è stato analizzato l'assetto geologico e geomorfologico dell'area, con particolare riferimento all'evoluzione del corso d'acqua e alla distribuzione delle frane. Quindi, lo studio idrologico e idraulico del fiume ha permesso di determinare i profili idraulici e gli sforzi tangenziali. Confrontando le condizioni geologicamente critiche con quelle critiche da un punto di vista idraulico, si è individuata una correlazione tra la dinamica fluviale e la stabilità dei versanti adiacenti il corso d'acqua. Per validare tale correlazione, sono stati rilevati lungo l'alveo degli indicatori geomorfologici di instabilità, che sono stati poi integrati nella costruzione della carta della pericolosità al franamento.

Infine è stata studiata un'area specifica (gola di Barberino) al fine di evidenziare come durante gli eventi di piena si possano produrre elevati sforzi tangenziali, in grado di accelerare il processo di erosione al piede del versante, innescando un meccanismo di rottura progressiva dal piede verso monte.

**PAROLE CHIAVE:** *dinamica fluviale, frane, pericolosità*

#### INTRODUZIONE

La presente nota propone i risultati di una ricerca inerente gli aspetti idraulici e idrologici connessi alla modellistica dei processi franosi. L'obiettivo dello studio è stato quello di quantificare l'influenza sulla stabilità dei versanti di vari parametri idraulici e idrologici (in particolare, le variazioni del livello idrometrico e gli sforzi tangenziali) in relazione a diversi assetti litologico-strutturali. In tal modo si è voluto fornire un metodo che consente di valutare la pericolosità dovuta ai franamenti che si verificano lungo un corso d'acqua sulla base di condizioni geologiche e idrauliche riconosciute come critiche.

Lo studio è stato applicato alla porzione media del bacino idro-

#### ABSTRACT

The paper deals with a methodology to assess the landslide hazard along rivers on the basis of geological and hydraulic conditions, recognized as critical. As an example, the methodology was applied in the middle Trebbia Valley (Northern Italy) where slopes are characterised by several landslides and the Trebbia River, often braided, curves "weak rocks" (OLIVEIRA, 1990).

First the geological and geomorphological setting of the area was analysed, with particular reference to the evolution of the river-bed and to the location of those areas subjected to landslides. Then, the hydrologic and hydraulic study of the River allowed to determine both flood contours and shear stress for erosion. A correlation between the fluvial dynamic and the slope stability near by the river was identified comparing the hydrologic and geologic critical conditions. To validate this correlation, the geomorphologic instability indicators were surveyed and then they were used to improve the landslide hazard map.

Finally, a specific area (Barberino gorge) was studied, to point out that the flood events can produce important shear stress for erosion, accelerating the erosion at the slope foot; therefore the landslide progresses from the bottom to the top.

**KEY WORDS:** *river dynamic, landslide, hazard*

#### INTRODUCTION

This paper presents the results of a research concerning the hydraulic and hydrological aspects involved in the landslide processes. This study is aimed at quantifying the interaction between slope instability and hydraulic and hydrologic parameters (especially as regards the hydrometric level variations and the shear stress linked to the erosion) in connection with the different lithological-structural conditions.

In this way, it was possible to supply a methodology to assess the landslide hazard along rivers on the basis of geological and hydraulic conditions, recognized as critical.

As an example, the methodology was applied in the middle Trebbia Valley (Northern Italy). In particular, the interaction between the

grafico della Val Trebbia (Nord Italia); nello specifico, si è cercato di individuare l'interazione tra l'asta principale del Fiume Trebbia (nel tratto compreso tra la confluenza del T. Aveto e il ponte a valle di Rivalta) e i versanti prospicienti il corso d'acqua.

A questo scopo, il lavoro è stato articolato in tre parti:

- la prima parte ha riguardato lo studio geologico e geomorfologico dell'area, con particolare riferimento alla dinamica evolutiva dell'asta fluviale e all'individuazione delle aree soggette a fenomeni franosi;
- nella seconda parte, si è eseguito lo studio idrologico e idraulico del corso d'acqua, per il quale sono stati determinati i profili di piena e gli sforzi tangenziali esercitati dalla corrente. Ciò ha consentito di definire le zone critiche da un punto di vista idraulico e di confrontarle con la cartografia delle frane;
- infine, la terza parte ha riguardato l'esame di un'area specifica, denominata "Gola di Barberino" (Comune di Bobbio), dove è presente un ampio dissesto in continua evoluzione e dove gli sforzi tangenziali sono risultati particolarmente elevati; attraverso lo studio di tale frana è stata quantificata l'influenza dell'azione erosiva del Fiume Trebbia sulla dinamica del versante.

## PERICOLOSITÀ DI FRANA LUNGO I CORSI D'ACQUA

In generale, il pericolo di frana dipende da numerosi fattori concomitanti, tra i quali l'acqua è spesso uno dei principali (IVERSON, 1992; KAWABE, 1992); dunque, la valutazione della pericolosità di frana deve tenere conto sia dei tradizionali fattori predisponenti quali pendenza, litologia, uso del suolo, morfologia, drenaggio ecc. (BARTOLOMEI *et alii*, 2006), sia delle caratteristiche idrogeologiche (CORTOPASSI *et alii*, 2006), spesso determinanti ai fini della suscettibilità al franamento (GATTINONI, 2008).

Inoltre, per individuare le zone soggette a rischio di franamento lungo un corso d'acqua è necessario anche definire le caratteristiche del corso d'acqua, inteso come sistema complesso formato da acqua e da materiale solido soggetto a erosione, trasporto e sedimentazione (RINALDI & SURIAN, 2002; SCHUMM *et alii*, 1984).

Generalmente, la suscettibilità al franamento viene valutata con riferimento alle soglie pluviometriche d'inesco (COROMINAS, 2001), che possono essere stimate sia attraverso un approccio deterministico, basato sulla modellazione numerica del processo di infiltrazione e delle conseguenti condizioni di stabilità, oppure tramite un approccio statistico, basato sull'analisi delle serie storiche di piogge e frane. Un'integrazione dei due approcci è stata recentemente proposta da BENEDETTI *et alii* (2006).

Oltre a tali aspetti connessi all'infiltrazione e alla saturazione dall'alto dei depositi superficiali, altri fattori connessi alla dinamica fluviale risultano fondamentali ai fini della stabilità dei versanti: il grado di erosione esercitato dalla corrente al piede del versante (ANGELI *et alii*, 1992) e la variazione del grado di saturazione associata agli eventi di piena (GILLON & HANCOX, 1992). Infatti, in presenza di un corso d'acqua in erosione, si instaura una tendenza all'aumento di pendenza delle sponde, dovuta appunto all'incisione operata dal tor-

Trebbia River (in between the Aveto stream confluence and the bridge situated to the south of Rivalta) and the slopes nearby the same River was identified.

The paper is divided in three sections:

- the first concerns the geological and geomorphological study of the area, with particular reference to the evolution of the river-bed and to the location of those areas subjected to landslides;
- the second concerns the hydrologic and hydraulic study of the River. Many flood contours and shear stress for erosion caused by the stream were determined. In this way, it has been possible to define the critical zones, as regards the hydraulic point of view, and to compare them with the landslides map;
- the third concerns the study of a specific area named "Gola di Barberino" (Barberino gorge-Bobbio district), where a wide landslide in progress is present and where the shear stress for erosion is particularly high.

The study of the Barberino landslide allowed to point out the influence of the River Trebbia erosion action on the slope evolution providing a methodological approach to introduce hydrologic aspects into landslides hazard assessment.

## LANDSLIDE HAZARD ALONG RIVERS

Generally, landslide hazard depends on a number of concomitant factors; among them, water is often very important (IVERSON, 1992; KAWABE, 1992); therefore, the landslide hazard assessment has to consider both common predisposing factors such as: slope gradient, lithology, land cover, morphology, drainage area (BARTOLOMEI *et alii*, 2006) and the groundwater setting (CORTOPASSI *et alii*, 2006) that brings about a hydrogeological susceptibility (GATTINONI, 2008).

Besides, in order to identify the landslide hazard areas along streams it is necessary to define the characteristic of the stream, meant as a complex system constituted by water and alluvial material subject to erosion, transportation and sedimentation (RINALDI & SURIAN, 2002; SCHUMM *et alii*, 1984).

Usually, the hydrological susceptibility to landslides is aimed to point out the pluviometrical thresholds (COROMINAS, 2001), that can be assessed either through a deterministic approach (based on the numerical modeling of the infiltration process and the slope stability) or through a statistic approach (based on the time series analysis of landslides and rainfalls). A mix of the two approaches was recently proposed by BENEDETTI *et alii* (2006).

In addition to these aspects linked to the infiltration and the saturation of the superficial deposits, other factors linked to the fluvial dynamic are essential in order to evaluate the slope stability: the erosion degree wielded by the river current at the slope foot (ANGELI *et alii*, 1992) and the change in the saturation degree linked to flood events (GILLON & HANCOX, 1992). Indeed, where the river erodes, the dip of the banks increases and, consequently, a potential slope instability can occur.

Besides these erosive processes, the forces (e.g. water pressure

rente, con il potenziale innesco di instabilità di sponda. A tali processi erosivi si aggiungono le variazioni delle forze agenti, in termini di pressioni dell'acqua, e di resistenza del materiale, indotte dall'infiltrazione delle acque meteoriche. Alcuni di questi fattori fanno insorgere nelle fasce di pertinenza fluviale i maggiori fenomeni di instabilità. Inoltre, l'area prossima all'alveo vede accumularsi l'intero volume di acqua infiltratosi nel versante: il livello piezometrico è quindi notevolmente più elevato (minore soggiacenza della falda) e la percentuale di suolo saturo (a parità di spessore) tende ad essere maggiore. Se a questo si aggiunge l'incremento di pendenza indotto dall'azione erosiva del corso d'acqua, si vede che la falda è potenzialmente soggetta ad emergere proprio laddove il torrente incide maggiormente la valle. Ciò comporta, purtroppo, numerose conseguenze negative:

- la saturazione del terreno superficiale può essere raggiunta con maggiore facilità;
- la concentrazione del deflusso ipodermico può dare origine a fenomeni di erosione sotterranea (HAGERTY, 1991; BONOMI *et alii*, 2005);
- la combinazione di fenomeni di erosione superficiale con la saturazione dei terreni su pendenze anche notevoli aggrava le condizioni di stabilità.

Dunque, la conoscenza della dinamica fluviale costituisce un elemento essenziale per valutare gli effetti del corso d'acqua sulla suscettibilità a franare. La ricerca è stata orientata proprio verso la creazione di uno strumento per la valutazione della suscettibilità al franamento in funzione delle caratteristiche di dinamica fluviale.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGRAFICO DELLA VAL TREBBIA

### *Assetto geologico*

Nell'area in esame, situata nell'Appennino Settentrionale, si possono riconoscere le seguenti unità tettoniche:

- Unità Liguri: caratterizzate dalla presenza di ofioliti, o rocce verdi, (basalti e gabbri di età giurassica), di crosta oceanica. Tali ofioliti sono associate a sedimenti del Cretaceo, depositati in ambiente pelagico e a sedimenti torbiditici di età paleocenico-eocenica. Tra le Formazioni affioranti si ricordano: Le Argille a Palombini, i Calcari a Calpionella, le Arenarie di Scabiazza e la Formazione di Val Luretta;
- Successione Epiligure: potente successione sedimentaria che affiora lungo il bordo della pianura piacentina ed è costituita da materiale detritico, come conglomerati ed arenarie grossolane, derivato dall'erosione delle ofioliti e delle coperture sedimentarie ad esse associate. Tra le Formazioni affioranti si ricordano: le Arenarie di Ranzano e le Marne di Monte Piano. La Successione Epiligure si è depositata sopra le Unità Liguri;
- Unità Subliguri: costituite da successioni di rocce sedimentarie di età terziaria, prevalentemente oligo-miocenica, quali ad esempio: la Successione di M. Penice, le Argille e i Calcari di Canetolo e la Successione di Salsominore;
- Unità Toscana: costituita prevalentemente da arenarie della Formazione di Bobbio del Miocene inferiore (Arenarie di San Salvatore,

and material strength) change, as a consequence of the infiltration of meteoric water. This occurs because the whole water volume seeped into the slope can gather near the channel so that the water table and the percentage of saturated soil (if thickness is equal) are higher. Where the river erodes and the banks dip increase, the water table can rise to the surface bringing about following consequences:

- the saturation of soil can be reached more easily;
- the concentration of the groundwater downflow can trigger underground erosion phenomena (HAGERTY, 1991; BONOMI *et alii*, 2005);
- the surface erosion phenomena linked to the saturation of the soils having high dip increase the instability conditions.

Therefore, the knowledge of the river dynamic is very important to study the effects of the water flow on landslide susceptibility. The research was aimed at creating a tool for the susceptibility assessment as a function of the river dynamic.

## GEOLOGICAL, GEOMORPHOLOGIC AND HYDROGRAPHICAL SETTING OF TREBBIA VALLEY

### *Geological setting*

The studied area is located in the Northern Apennine where following tectonic Units can be recognized (Fig. 1):

- "Liguri Unit": this Unit is characterized by ophiolites, or green magmatic rocks (Jurassic basalts and gabbros), coming from oceanic basins. These Ophiolites are connected to the Cretaceous pelagic sediments and to the Turbidite (Paleocene- Eocene aged). The outcropping formations include: the Palombini Clays, the Calpionella Limestone, the Scabiazza Sandstones and the Val Luretta Formation;
- "Epiligure Sequence": a thick sedimentary sequence, outcropping along the plane margin, constituted by clastic rocks like conglomerates and sandstones, originated from the Ophiolites and from the sedimentary cover erosion. The outcropping formations include: the Ranzano sandstones and the Monte Piano marles. This sequence settled on the "Unità Liguri";
- "Subliguri Units": these Units are constituted by a sequence of Tertiary sedimentary rocks (mainly Oligocene-Miocene) such as the M. Penice Sequence, the Clays and the Limestones of Canetolo and the Salsominore Sequence;
- "Toscana Unit": this Unit is mainly constituted by the Bobbio Formation sandstones (San Salvatore Sandstones, Brugnello clays

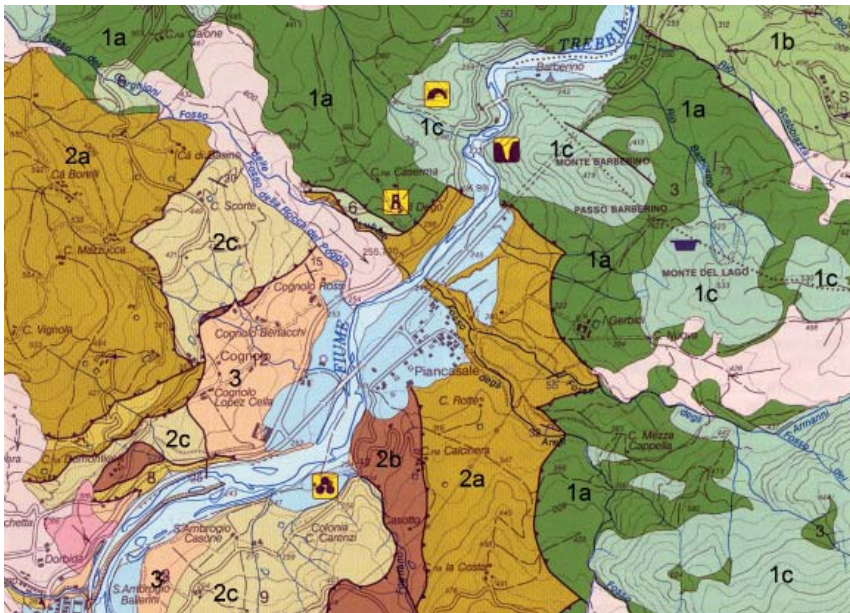


Fig. 1 - Schema geologico-strutturale relativo ad un tratto della Val Trebbia (da Regione Emilia-Romagna, 2002). Successione Ligure: 1a = Complesso argilloso mesozoico (le Formazioni affioranti in questa zona sono: i Calcari a Calpionella e le Argille a Palombini); 1b = Complesso turbiditico mesozoico (la Formazione affiorante in questa zona è rappresentata dalle Arenarie di Scabiazza); 1c = Ofoliti; 1d = Complesso turbiditico terziario (le Formazioni affioranti in questa zona sono: la Formazione di Val Luretta). Successione SubLigure: 2a = Complesso Turbiditico a componente carbonatica prevalente (le Formazioni affioranti in questa zona sono: le Argille e i Calcari di Canetolo e la Successione di M. Penice); 2b = olistoliti costituiti dalle argille e dai calcari di Canetolo; 2c = Complesso argilloso prevalente (la Formazione affiorante in questa zona è rappresentata dalla Successione di Salsominore). Successione Toscana: 3 = Marne di Monte la Croce

- Geological -structural sketch map of the middle Trebbia Valley (Regione Emilia-Romagna, 2002). 1 = Ligurian Sequence: 1a = the Mesozoic clayey Complex (in this area, the outcropping Formations are: the Calpionella Limestone and the Palombini Clays); 1b = the Mesozoic Complex of turbidites (in this area the outcropping Formation is the Scabiazza Sandstones); 1c = Ophiolites; 1d = the Tertiary Ccomplex of Turbidites (in this area the outcropping Formation is the Val Luretta Formation).

2 = SubLigurian Sequence: 2a = Complex of Turbidites with mainly limestones (in this area the outcropping Formations are: the Canetolo Clays and Limestones and the M. Penice sequence); 2b = olistoliths constituted by Canetolo clays and limestones; 2c = Complex with mainly clays (in this area the outcropping Formation is the Salsominore Sequence); 3 = Tuscan Sequence: 3 = Monte la Croce

Argilliti del Brugnello e Marne di Monte la Croce) che affiorano estesamente lungo il fondovalle del Fiume Trebbia.

Qui di seguito si riporta (Fig. 1) lo schema geologico strutturale relativo ad un tratto della Val Trebbia.

#### Assetto idrografico e geomorfologico

Il Fiume Trebbia, corso d'acqua principale dell'omonima valle, nasce nell'Appennino ligure (M. Prelà, 1406 m s.l.m.) e confluisce nel Po poco a ovest di Piacenza, dopo un percorso di circa 115 km. L'asta principale del Fiume Trebbia è suddivisibile in tre tratti distinti per caratteristiche geomorfologiche e per comportamento idraulico:

- un tratto montano (dalla sorgente fino a Bobbio), che si presenta costantemente incassato ed inciso nel substrato roccioso, con meandri in roccia molto irregolari (Fig. 2), dalla curvatura generalmente elevata, in lenta evoluzione; questo tratto di valle è contraddistinto da un'elevata energia del rilievo, con numerose forme di erosione (gole e meandri incassati); di conseguenza, la capacità di trasporto di materiale solido è elevata e non vi sono significative forme di deposizione;
- un tratto intermedio, dove si osserva una diminuzione della pendenza media sia dei versanti che dell'alveo, costituito da materiali di scarsa consistenza. In tale tratto si osserva un allargamento delle aree alluvionali, la presenza di conoidi alla confluenza dei principali affluenti e di numerosi dissesti lungo i versanti;
- un tratto di pianura, con alveo tipicamente multicursale, che scorre in un'ampia conoide con numerose aree golenali e notevoli depositi alluvionali fino alla confluenza in Po; tale morfologia

and Monte la Croce marls) Low Miocene aged. These sandstones widely outcrop along the meanders of the Trebbia River.

The Figure 1 represents the structural - geological sketch map of a portion of the Trebbia Valley

#### Geomorphologic and hydrographic setting

The Trebbia River is the most important stream of the area and it gives its name to the valley. Its spring is located in the Ligurian Apennine (Prelà mountain, 1406 m a.s.l.) and it flows into the Po River to the west of Piacenza, after flowing a distance of about 115 km. The Trebbia River can be divided in three stretches on the basis of geomorphologic features and hydraulic behaviour.

- a mountain stretch (from the source to Bobbio): this stretch is very embanked with irregular meanders, having a marked bending and a slow evolution, carved in the bedrock (Fig. 2); this portion of Trebbia Valley is characterized by high relief energy (frequent slope breaking), and many erosion forms, as a consequence the river can mobilize amounts of sediments and transport them downstream rather than deposit them;
- a middle stretch, where slopes and river-bed have a low gradient. Here the bedrock is constituted by weak rocks, flood plains are larger and many fans are present, where tributaries join the Trebbia River, and slopes are characterised by several landslides;
- a floodplain stretch: the river-bed is typically braided, it flows in a wide fan with many flood beds and thick alluvial sediments till the confluence with the Po River; the deposition of sediments are



Fig. 2 - Meandri del Fiume Trebbia  
- Trebbia River meanders



Fig. 3 - Ubicazione dell'area di studio  
- Location of studied area

determina un rallentamento della corrente, con tendenza alla deposizione del carico solido.

In particolare, lo studio si è concentrato sul tratto intermedio e la parte bassa del tratto montano (Fig. 3), laddove lo stato di dissesto è più accentuato.

### ANALISI DELLO STATO DI DISSESTO

Nell'area della medio-bassa Val Trebbia i complessi sedimentari torbiditici (appartenenti alle Successioni Epiligure e Ligure) danno luogo a rilievi generalmente poco acclivi. La natura pelitica dei versanti è causa di vasti e diffusi dissesti, in evoluzione e quiescenti, soprattutto in prossimità del Fiume Trebbia e dei suoi affluenti principali. Di conseguenza, si osservano vari fenomeni di modificazione morfologica dell'alveo del Trebbia, come la disattivazione di alcuni canali laterali, nelle zone in cui il fiume è intrecciato, o il restringimento e l'incisione di alcune sezioni e l'erosione di alcuni tratti di sponda.

Procedendo verso l'alta Val Trebbia il numero dei dissesti diminuisce progressivamente, in quanto le rocce ofiolitiche e arenacee affioranti hanno qualità migliori. Alle frane per colamento si sostituiscono le frane per crollo, ribaltamento, scivolamento planare e/o a cuneo. In ogni caso, sempre più raramente tali dissesti vanno ad interessare il corso d'acqua.

Ai fini della realizzazione della carta di pericolosità da frana è stato utilizzato il metodo ZERMOS (HUMBERT, 1977, VARNES & IAEG, 1984), effettuando una serie di operazioni di seguito riassunte:

- sono state realizzate le carte tematiche di base (riguardanti la geologia, le pendenze, la geomorfologia, l'uso del suolo, i domini

favorevoli da un basso tasso di portata).

In particolare, questo studio riguarda il tratto intermedio e la parte bassa del tratto montano (Fig. 3), laddove lo stato di dissesto è più accentuato.

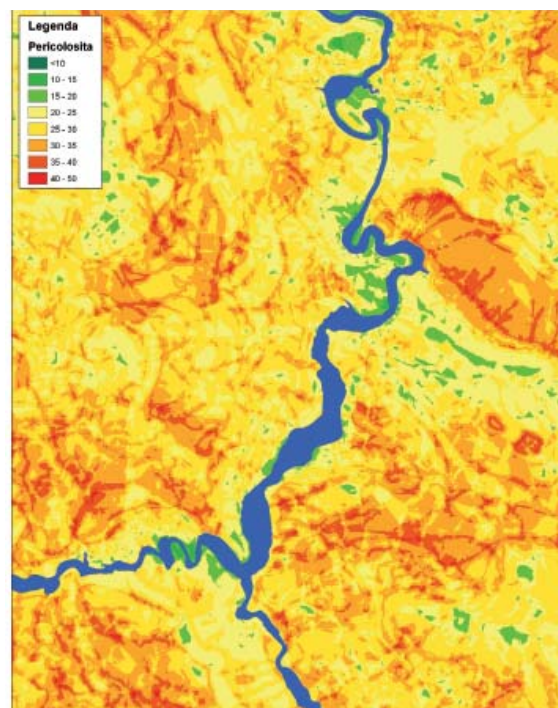
### LANDSLIDE HAZARD MAP

In the middle-lower Trebbia Valley, the sedimentary turbidites (Epiligure and Ligure Sequences) shape not very steep slopes. The presence of those rocks is the cause of wide landslides (active and dormant) located near the Trebbia river and its most important tributaries. Consequently, it is possible to observe many morphologic changes of the Trebbia river-bed, such as the extinction of some lateral channels, the narrowing or the local erosion of banks. In the upper Trebbia Valley the number of landslides decreases because of the good quality of the outcropping ophiolites and sandstones. Falls, toppling, translational and/or wedge slides take the place of flows. These movements are unlikely to reach the river.

To map the landslide hazard of the area (Fig. 4) the ZERMOS methodology was used (HUMBERT, 1977, VARNES & IAEG, 1984), following this procedure:

- the basic thematic maps were created (geology, slopes, geomorphology, land use, structural domains, anthropic works, such as roads, etc.);
- the previous maps were superimposed over the landslides map of the area (REGIONE EMILIA ROMAGNA, 2002);
- the parameter weights on the landslide susceptibility were calculated;
- an index (ranging from 0 to 50) of the landslide susceptibility was

Fig. 4 - Carta della pericolosità. I colori e i corrispondenti numeri indicano i diversi livelli di pericolosità  
 - *Landslide hazard map. The different colours and the corresponding numbers represent the relative hazard degree*



strutturali, le opere antropiche, quali le strade, ecc.);  
 - tali carte sono state sovrapposte a quella relativa ai dissesti presenti nell'area studiata (REGIONE EMILIA ROMAGNA, 2002);  
 - sono stati valutati i pesi che i singoli parametri (geologia, pendenze, geomorfologia, ecc.) hanno sulla suscettibilità al franamento;  
 - tramite un'operazione di media ponderata di tutti i parametri considerati, è stato calcolato un indice di pericolosità relativa (variabile tra 0 e 50) in base al quale è stata poi costruita la carta di pericolosità (Fig. 4).

In particolare, la zona riportata nella Figura 4 presenta valori di pericolosità compresi tra 15 (colore verde, classe di pericolosità molto bassa) e 45 (colore rosso scuro, classe di pericolosità molto alta). Dalla carta si osserva che oltre il 50% della zona è caratterizzata da una pericolosità da frana medio-alta.

**ANALISI DELLA DINAMICA FLUVIALE**

*Evolutione morfologica*

I rilevamenti in sito hanno portato all'individuazione di tratti di alveo caratterizzato da peculiari tendenze evolutive e, sulla base di studi effettuati (BEZOARI *et alii*, 1984), si è potuto osservare che:

- la capacità di trasporto solido del Trebbia è elevata, in particolare in confronto ad altri affluenti del Po, soprattutto di sinistra (Tab. 1): per questo motivo, è stato, ed è, sede di un'intensa attività estrattiva di inerti dal suo alveo;
- negli ultimi venti anni tale capacità si è ridotta per effetto della sistemazione degli affluenti della parte montana del bacino: questa riduzione, legata a una continua pressione estrattiva, ha provocato un'alterazione dell'equilibrio della dinamica dell'alveo, portando a locali fenomeni di erosione verticale e laterale.

calculated, as the average sum of the considered parameters, and mapped (Fig. 4).

In particular, the zone mapped in Figure 4 shows values of the landslide susceptibility index ranging from 15 (green colour, corresponding to very low hazard) to 45 (deep red colour, corresponding to very high hazard). As shown in the map, more than 50% of the area is characterised by a medium-high landslide hazard.

**FLUVIAL DYNAMIC ANALYSIS**

*Morphologic evolution*

The in situ surveys allowed to localize the stretches of the river characterized by particular evolutionary trends and, on the basis of existing studies (BEZOARI *et alii*, 1984), it was possible to observe that:

- the Trebbia River has a high solid load, compared to other Po tributaries (Tab. 1); for this reason, in the past, the Trebbia river-bed was interested by an intensive quarrying activity;
- in the last twenty years, this capacity decreased also due to the improvement in watersheds management along many tributaries, especially in the mountain areas of the basin. The quarrying activity together with the basin watersheds management caused changes in the dynamic equilibrium of the river-bed, with local erosion phenomena (both vertical and lateral).

Superficie Area km <sup>2</sup>	Quota media Average level m s.l.m. / m a.s.l.	Precipitazione media annua Average annual rainfall mm	Erosione specifica Specific erosion mm/anno / mm/year	Capacità di trasporto al fondo Bed solid load m <sup>3</sup> /anno / m <sup>3</sup> /year	Capacità di trasporto in sospensione Suspended solid load m <sup>3</sup> /anno / m <sup>3</sup> /year
920	822	1398	0.27	27E10 <sup>3</sup>	190.6E10 <sup>3</sup>

Tab. 1 - Caratteristiche del bacino e capacità di trasporto solido del Fiume Trebbia (AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO, 2001)  
 - *Characteristics and solid load of Trebbia River, according to the PAI study (AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO, 2001)*

Fig. 5 - Variazioni (misurate negli ultimi 30 anni) della quota del thalweg e della quota media del profilo dell'alveo in corrispondenza delle varie sezioni trasversali rilevate lungo il Fiume Trebbia. I valori positivi indicano innalzamenti del fondo dell'alveo, mentre i valori negativi indicano gli abbassamenti. Poiché le sezioni trasversali considerate non sono tra loro equidistanti, l'asse delle ascisse non è rappresentativo delle distanze, ma solo delle progressive: da valle (sez. 1) a monte (sez. 28)

- Variations measured in the last 30 years of the thalweg altitude and of the average altitude of the river-bed profile, in different cross-sections along the Trebbia River. Positive values indicate draw up of the river-bed, whereas negative values indicate draw-down. As the cross-sections are not at the same distance, the x-axis is not representative of the distance, but only indicates the progression from the lower part (section 1) to the upper part of the basin (section 28)

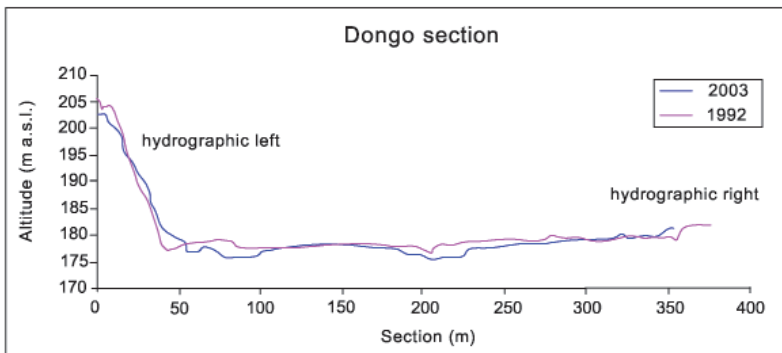
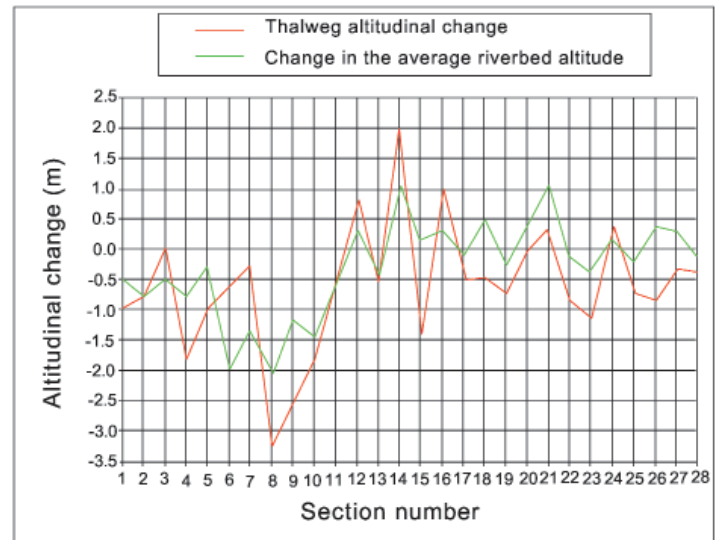


Fig. 6 - Esempio di variazione del profilo lungo una sezione trasversale del corso d'acqua

- Examples of the altitude variation along a cross-sections of the Trebbia River

Per comprendere quanto l'incisione laterale e verticale in atto siano diffuse lungo il corso d'acqua si è proceduto ad un confronto morfologico fra le sezioni trasversali in periodi diversi. In particolare sono state messe a confronto le sezioni trasversali (che rappresentano il profilo topografico dell'alveo), con le planimetrie rilevate tra gli anni 1815 e 2000 e i risultati di uno studio morfologico eseguito nel 2003 (SOGNI, 2003). Dal confronto si evince che le maggiori variazioni morfologiche e i fenomeni di dissesto più significativi (erosione spondale, esondazione, sovralluvionamento) si sono verificati nella medio-alta Val Trebbia, dove si registrano:

- una tendenza al restringimento dell'alveo di piena;
- un significativo approfondimento dell'alveo, che nel tratto intermedio non è controllato da fattori geologici (substrato roccioso situato a profondità elevata), mentre più a monte diminuiscono le quote del thalweg e aumentano quelle medie del profilo dell'alveo (Fig. 5);
- la maggiore tendenza all'approfondimento si localizza talora nella parte centrale dell'alveo (Fig. 6) e talora in prossimità delle sponde, soprattutto in corrispondenza dei manufatti; in quest'ultimo caso, a lungo termine, si potrà verificare un aumento di erosione spondale, con conseguenti nuovi disequilibri.

These erosion phenomena can be observed comparing the morphologic cross-sections referring to different periods. In particular, cross-sections surveyed in between 1815 and 2000 and the results of a recent morphologic study (SOGNI, 2003) were examined.

The most important phenomena (banks erosion, overflow, etc.) are present in the middle-high part of Trebbia Valley, where one can observe:

- a narrowing trend of the river-bed flooding;
- a deep erosion of the river-bed, especially where the bedrock is located at great depth, while upstream the thalweg altitudes decrease and the medium cross-section profile altitudes increase (Fig. 5);
- a deep erosion that can be located either in the central part of the riverbed (Fig. 6) or near the river banks, especially where man-made works (such as bridges) are present; in this latter case, in the long period, instability phenomena will be triggered.

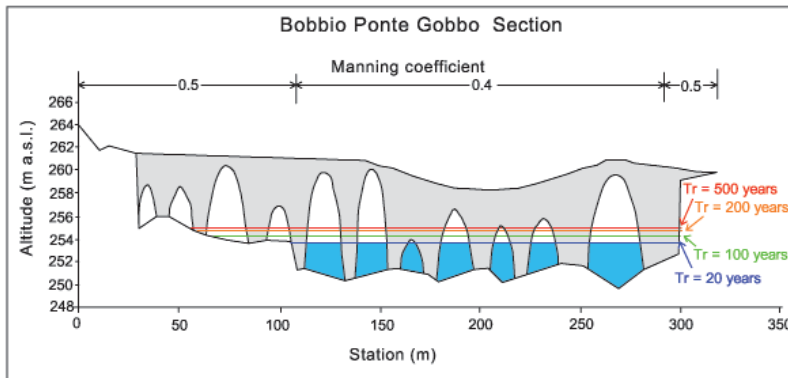


Fig. 7 - Esempio di profili di piena per assegnati tempi di ritorno in corrispondenza della sezione trasversale del Ponte Gobbo di Bobbio  
- Example of flood profiles for assigned return periods in the Ponte Gobbo cross-section

### Studio idrologico e idraulico

Lo studio idrologico è stato effettuato su 74 sezioni trasversali (AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO, 2001), in corrispondenza delle quali sono state calcolate le portate al colmo per assegnati tempi di ritorno, le corrispondenti altezze idrometriche e gli sforzi tangenziali.

Per stimare le portate al colmo sono stati utilizzati metodi diretti, laddove si disponeva di sufficienti dati di portata, integrati con metodi indiretti, ricorrendo al principio della similitudine idrologica fra il bacino in esame e quelli limitrofi, nonché a modelli matematici di trasformazione afflussi-deflussi (Metodo Razionale).

La determinazione dei profili idraulici (Fig. 7) è stata condotta in regime permanente mediante il codice di calcolo HEC-RAS (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2002), che si basa sulle seguenti assunzioni: portata costante; flusso monodimensionale; distribuzione idrostatica delle pressioni; variazioni geometriche graduali fra le sezioni trasversali; carico specifico costante; pendenza di fondo inferiore a 1:10. Sono stati così ricavati:

- i livelli idrometrici, calcolati con lo Standard Step Method (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2002); i profili idrometrici così ottenuti forniscono indicazioni sulle aree a rischio di inondazione;
- la forza di trascinamento esercitata dalla corrente fluida sul perimetro bagnato, calcolata come prodotto tra il peso specifico dell'acqua, il raggio idraulico e la pendenza di fondo (CHOW, 1957); i valori così ottenuti, confrontati con gli sforzi tangenziali critici (calcolati col metodo di SHIELDS, 1936), consentono di individuare le zone in cui è più alto il rischio di erosione spondale; a questo scopo si è fatto riferimento al diametro medio  $d_{50}$  del materiale costituente l'alveo, ricavato da curve granulometriche sperimentali.

In tal modo è stato possibile individuare le zone caratterizzate da un livello idrometrico particolarmente elevato, in genere localizzate in corrispondenza di tratti d'alveo stretto e incassato, spesso interessati da fenomeni di dissesto (ad es. in prossimità del ponte di Barberino e immediatamente a monte di Perino). In queste stesse zone anche gli sforzi tangenziali esercitati dalla corrente sono risultati maggiori, come anche nelle sezioni a valle dei ponti (Fig. 8). In tutte queste zone, la capacità erosiva della corrente sulle sponde è, in caso di piene, notevole.

### Hydrologic and hydraulic study

The hydrologic study was carried out just next to 74 cross-sections, realised along the Trebbia River by Autorità di Bacino del fiume Po (PO RIVER DRAINAGE BASIN AUTHORITY, 2001). The peak discharges for assigned return periods, the corresponding water surface elevations and the shear stress for erosion were calculated.

The direct methods were adopted to estimate the peak discharges, where a sufficient discharge data set was available, combined with indirect methods, using the hydrologic similarity between the examined catchment basin and the next ones or the inflow-outflow transformation mathematical models (Rational Method).

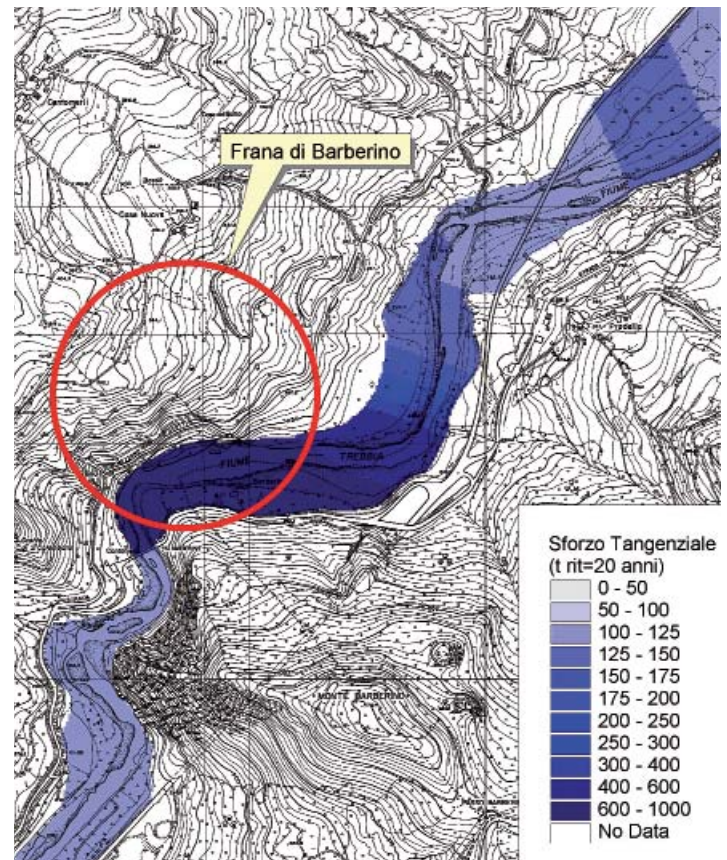
The hydraulic profiles (Fig. 7) were determined with the HEC-RAS code (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTRE, 2002) considering a steady-state flow. This code is based on following hypotheses: steady-state discharge; one-dimensional flow; hydrostatic pressure distribution; gradual variation among the cross sections; constant specific load; bed gradient below 1:10. Then, following features were obtained:

- the water surface elevations, calculated through the Standard Step Method (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2002); these hydraulic profiles allowed to define the areas subject to flooding risk;
- the shear stress for erosion on the wetted perimeter, calculated as the product among the specific weight of the water, the hydraulic radius and the river-bed slope (CHOW, 1957); the obtained values, compared with the critical shear stress (calculated through the SHIELDS criterion, 1936), allowed to identify the areas in which the risk of bank erosion is higher. For these processing, the  $d_{50}$  size bed material obtained by the experimental particle-size distribution was considered.

Results showed that the areas characterized by a very high water surface elevation are located where the river-bed shape is narrow and embanked and where the landslides are present (for example near the Barberino bridge and to the North of Perino village). In these areas, also the shear stresses for erosion are higher as well as downstream the bridges (Fig. 8), and, in case of flood, the erosive capacity of the stream is considerable.



Fig. 8 - Esempio di distribuzione degli sforzi tangenziali (in Pa) lungo un tratto del Fiume Trebbia, corrispondenti a tempi di ritorno ventennali  
 - Example of shear stress for erosion distribution along the Trebbia river, corresponding to a 20-year return period. The dark blue means higher shear stress values in Pa



## ANALISI DELLE INTERAZIONI TRA IL FIUME E LA STABILITÀ DEI VERSANTI

Sulla base degli studi effettuati è stato possibile individuare delle aree critiche sia dal punto di vista geologico che idrologico-idraulico (Fig. 9).

In particolare, le criticità determinate dal corso d'acqua sono state individuate sia in funzione dell'escursione del livello idrometrico, sia in relazione agli sforzi tangenziali che la corrente esercita sul fondo e sulle sponde; tali informazioni hanno consentito di identificare:

- le aree a rischio di esondazione;
- le porzioni di versante soggette a cicli di saturazione-desaturazione;
- i tratti d'alveo interessati da erosione/sedimentazione;
- le aree caratterizzate dalle maggiori sollecitazioni idrauliche agenti al piede del versante.

Le zone critiche da un punto di vista geologico (caratterizzate da movimenti franosi o instabilità generalizzate) sono state invece valutate sia arealmente, tramite le cartografie tematiche, che puntualmente, tramite i rilievi in sito. Dal confronto tra le problematiche geologiche e idrauliche è stato quindi possibile stabilire una correlazione tra la dinamica fluviale e la stabilità dei versanti.

La validazione dei risultati ottenuti da tale analisi è stata effettuata attraverso il rilevamento sul terreno di alcuni parametri geomorfologici ed idraulici del fiume a cui vengono attribuiti dei punteggi la cui somma fornisce il valore dell'"Indice di Instabilità" del tratto di

## INTERACTION BETWEEN RIVER DYNAMIC AND SLOPE STABILITY

The study allowed to identify the areas characterised by geological and hydrologic critical conditions. (Fig. 9).

As regards the Trebbia River and its hydrologic critical conditions, the analysis of the water surface variations and the shear stress for erosion on the bed and on the side slope distribution enabled to identify following elements:

- the areas interested by flood risk;
- the slope subject to saturation-desaturation cycles;
- the stretches of the river characterised by erosion/sedimentation;
- the areas subject to the highest hydraulic stress along the slopes foot.

The geological critical conditions (characterised by landslides presence) were identified by thematic maps and by in situ surveys. A correlation between the fluvial dynamic and the slope stability was identified, comparing the hydrologic and geologic critical conditions.

The results of these analyses were validated surveying some geomorphologic instability indicators along the river. Summing up the scores given to these indicators, an "Instability Index" (MASETTI, 1998; SIMON & DOWNS, 1995) can be assessed. On the basis of their experience, the Authors suggest that Instability Index over 15 indicates a potentially instable river-bed. Following parameters are considered for the Instability Index assessment:

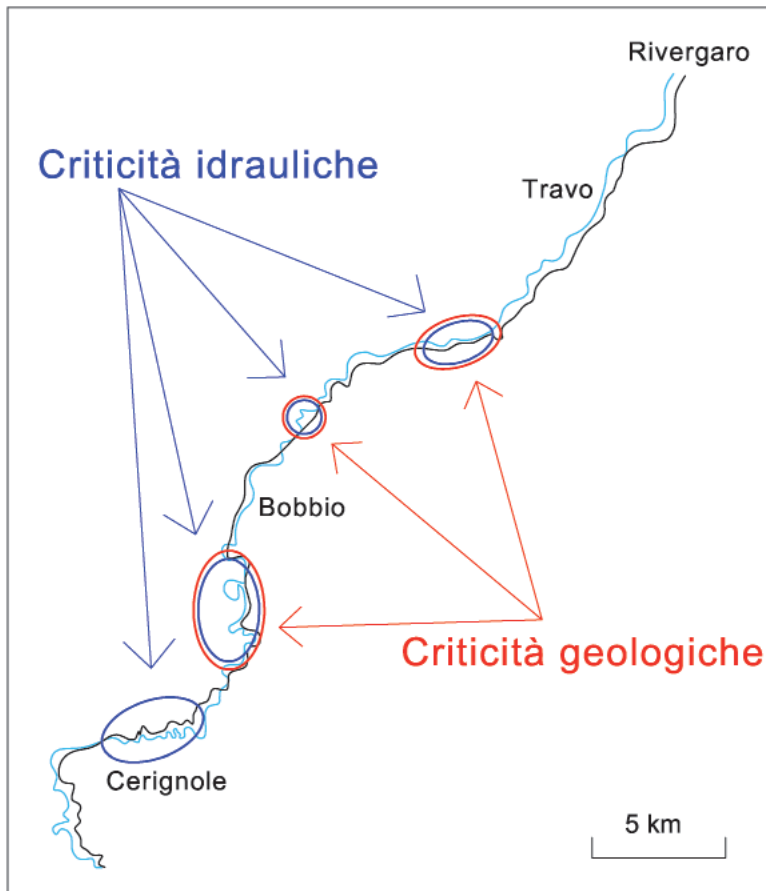


Fig. 9 - Zone critiche sia dal punto di vista idrologico che geologico  
 - Critical zones from the geological and hydraulic point of view

corso d'acqua analizzato (MASETTI, 1999; SIMON & DOWNS, 1995). Gli Autori suggeriscono, sulla base dell'esperienza e dei numerosi casi trattati, che i tratti di corsi d'acqua aventi Indici di Instabilità superiori a 15 sono da considerare potenzialmente instabili. I parametri che vengono presi in considerazione per l'applicazione del metodo e per la definizione dell'"Indice di Instabilità" sono i seguenti (Tab. 2):

- materiale che costituisce l'alveo fluviale (roccia o sedimenti): rappresenta la resistenza ai processi erosivi;
- protezioni presenti nell'alveo o lungo le rive: il valore maggiore viene assegnato quando le sponde risultano entrambe protette, perché, per effetto della protezione delle sole sponde, sul fondo del canale si registrano gli sforzi massimi e la velocità della corrente è più elevata;
- stadio di evoluzione del corso d'acqua: per ottenere questo parametro ci si deve rifare ad una precedente classificazione proposta da SIMON (1989); lo stadio di evoluzione dipende dalla forma dell'alveo, dalla vegetazione presente e dal processo dominante (erosione o accumulo);
- percentuale di restringimento dell'alveo: per assegnare il valore a questa variabile si deve far riferimento alle sezioni immediatamente precedenti e successive a quella del sito esaminato. All'aumentare della percentuale di restringimento dell'alveo aumenta il valore assegnato

- the river-bed material (rock or sediments), that represents the strength to erosion;
- the existence of river-bed protection: the highest values are assigned when both the river banks are protected, as in this case along the river-bed the velocity is highest and the shear stress maximum;
- the stage of channel evolution: for this parameter a previous classification of SIMON (1989) has to be considered, according to which the evolution stage depends on the river-bed shape, the vegetation and the dominant process (erosion or sedimentation);
- the percentage of the channel constriction: for increasing values of the constriction percentage, the river-bed shear stress increases;
- the percentage of channel blockage: horizontal, vertical, total;
- the bank erosion type: only due to the river erosion or also due to the presence of weak material arising from preceding slope mass movements;
- the proximity of a meander;
- the high flow angle of approach;
- the percentage of vegetative cover.

These morphologic indicators were surveyed along both river-banks and allowed to define a correlation between the fluvial dynamic

1 – Materiale che costituisce l'alveo / River-bed material					
Roccia Bedrock	Ciottoli/blocchi Boulder/cobble	Ghiaia Gravel	Sabbia Sand	Alluvionale indistinto Alluvium	Argilla/limo Silt/clay
0	1	2	3	3.5	4
2 – Protezioni presenti / River-bed protection					
Sì/Yes	No	Con 1 sponda protetta/With 1 bank protected		Con 2 sponde protette/ With 2 banks protected	
0	1				
3 – Stadio di evoluzione del corso d'acqua / Stage of channel evolution					
I	II	III	IV	V	VI
0	1	2	4	3	1.5
4 – Percentuale di restringimento dell'alveo / Percent of channel constriction					
0-5	6-25	26-50	51-75	76-100	
0	1	2	3	4	
5 - Percentuale di ostruzioni: orizzontali, verticali, totali / Percent of channel blockage: horizontal, vertical, total					
0-5	6-25	26-50	51-75	76-100	
0	1	2	3	4	
6 – Tipo di erosione di sponda: destra, sinistra / Bank erosion for each bank					
Nessuna/None		Fluviale/Fluvial		Per frane/Mass-wasting	
0		1		2	
7 – Vicinanza ad una curvatura (m) / Proximity of a meander (m)					
0-10	11-20	21-35		>35	
3	2	1		0	
8 – Angolo di incidenza del flusso (°) / High flow angle of approach (°)					
0-10	11-25	26-40	41-60	61-90	
0	1	2	2.5	3	
9 - Percentuale di copertura vegetale / Percent vegetative cover					
0-15	16-30	31-60	61-99	100	
3	2.5	2	1	0	

Tab. 2 - Parametri considerati per la definizione dell'indicatore morfologico di instabilità e relativi punteggi  
- Parameters for the Instability Index assessment and their corresponding scores

alla variabile, in quanto a causa di questi restringimenti aumenta il valore dello sforzo tangenziale al fondo, a causa della diminuzione della sezione disponibile per il deflusso delle acque, a parità di portata;

- percentuali di ostruzioni: orizzontali, verticali, totali;
- tipo di erosione di sponda: determinata dalla sola azione fluviale o dalla presenza di materiale molto erodibile precedentemente franato;
- vicinanza ad una curvatura del corso d'acqua (in metri);
- angolo di incidenza del flusso (in gradi);
- percentuale di copertura vegetale lungo le sponde del corso d'acqua.

I differenti parametri, valutati distintamente sulle sponde destra e sinistra del corso d'acqua, e i relativi punteggi sono stati trasferiti in ambiente GIS, al fine di ottenere una loro rappresentazione continua e non puntuale. E' stata quindi redatta la carta di distribuzione degli "Indici di Instabilità" (Fig. 10).

Sovrapponendo la carta di pericolosità da frana ottenuta con il me-

and the slope stability (Tab. 2, Fig. 10) by mean of an Instability Index. This Index is obtained adding up the values assigned to each morphologic indicators.

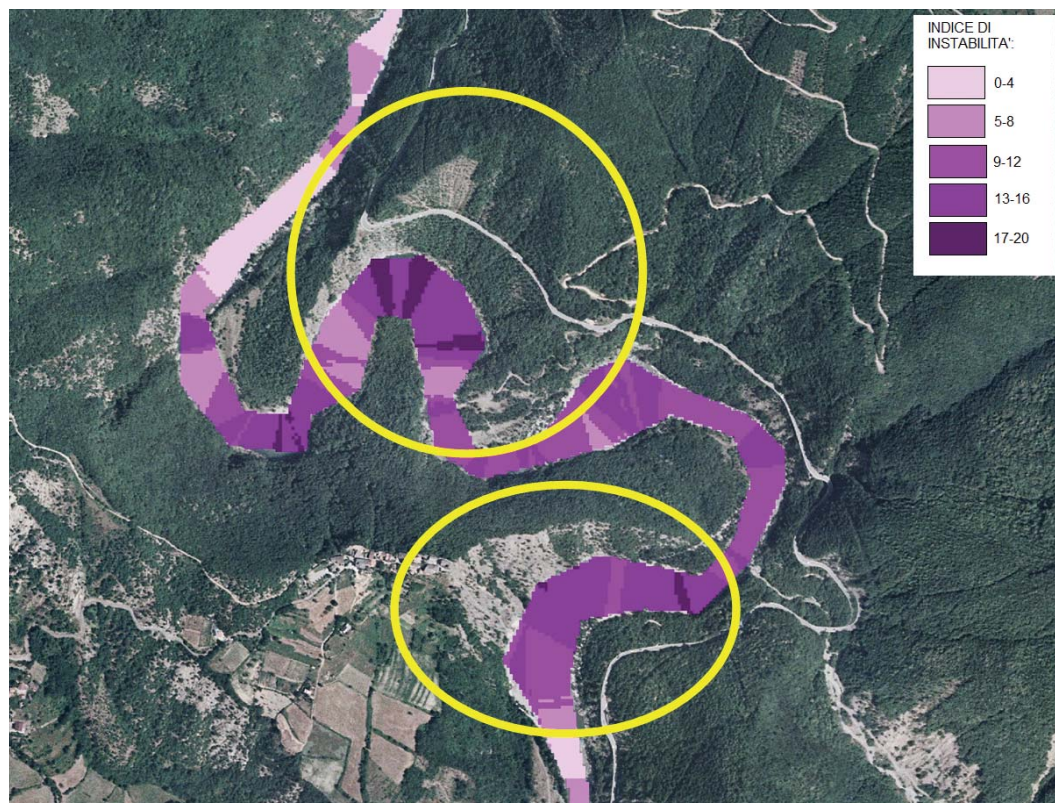
By layering the landslide hazard map, obtained with the ZERMOS method, with the instability index distribution (Fig. 11) it is possible to observe that where the instability indexes are higher, the landslide hazard is not always high. On the contrary, the in situ survey confirms the presence of landslides (for example at Brugnello and near Pianelle zone, Fig. 12).

A particularly significant example concerning the interaction between river dynamic and slope instability is represented by the Barberino landslide (Fig. 13), that is located along the left river bank. This stretch of river is very critical from the hydraulic point of view.

The Barberino landslide interests the Mesozoic clayey Complex (Ligurian Sequence); this complex is very heterogeneous and mainly

Fig. 10 - Distribuzione areale dell'indice di instabilità. In corrispondenza di valori elevati di tale indice sono ubicati due estesi movimenti franosi (visibili all'interno dei cerchi gialli)

- *Areal distribution of the instability index. Two large landslides (in the yellow circles) are situated where the instability index is very high*



todo ZERMOS, alla carta relativa all'ubicazione delle frane (Regione Emilia Romagna, 2002) e a quella della distribuzione degli indici di instabilità (Fig. 11), si può osservare che non sempre in corrispondenza di elevati indici di instabilità sono stati cartografati fenomeni di dissesto, la cui presenza è invece stata confermata dal rilevamento in sito (come ad esempio a Brugnello e nella zona di Pianelle, Fig. 12).

Un esempio particolarmente significativo dell'interazione tra la dinamica del versante e la stabilità dei versanti è costituito dalla frana di Barberino (Fig. 13), che interessa la sponda sinistra del fiume in un tratto critico dal punto di vista idraulico.

La frana di Barberino si sviluppa in rocce appartenenti al Complesso Argilloso Mesozoico (Unità Ligure); tale complesso è molto eterogeneo, prevalentemente argilloso, intensamente deformato, con assetto caotico, inglobante ofioliti, graniti, granitoidi, granuliti basiche e quarzo feldspatiche, diaspri, argille e calcari. Nella zona in esame, il Complesso Argilloso Mesozoico è a sua volta suddiviso in:

- Complesso di Monte Ragola: costituito da Arenarie ofiolitiche, Breccie mono-poligeniche a matrice pelitica, Breccie poligeniche a matrice arenitica, Olistoliti (ultramafiti e Argille a Palombini);
- Complesso di Casanova: costituito dalle Arenarie di Casanova.

Il cinematismo è di tipo "complesso"; infatti si riconoscono, nelle diverse parti del pendio (Figg. 14 e 15):

- fenomeni di crollo, ribaltamenti, scivolamento planare e a cuneo: interessano le ultramafiti, caratterizzate da sistemi di discontinuità

clayey, intensely deformed, with a chaotic setting, including ophiolite, granitic rocks, clays and limestones. In the study area, the Mesozoic clayey Complex is divided into:

- the complex of Monte Ragola (ophiolitic sandstones and breccia) and
- the Casanova Complex (sandstones).

The movement is "complex" and along the slope it is possible to identify (Figures 14 and 15):

- fall, topple, translational and wedge slide movements: these ones involved the ophiolites, characterized by a great amount of discontinuity sets, tectonites and mylonites, so that they can be considered "weak rocks";
- debris flow (occurring during the flood of the year 2001): the crown is placed between 370 and 350 m a.s.l. where soils (silt, sand with medium-sized – 0.2 m<sup>3</sup> – marly limestones blocks) and a counter slope layer of monogenic and polygenic breccias is present. The debris flow covered the ophiolites, outcropping in the medium-lower portion of the slope (at 290 m a.s.l.) and the municipality road (that was closed in 1990).

The flood of the year 2001 was considered in order to prove the link existing between slope instability and river dynamic. On this occasion, the value of the maximum discharge during the flood was about 2350-2400 m<sup>3</sup>/s, corresponding to a return period of about 90 years and to a water surface elevation, near the landslide cross section, of 7.4 m (corresponding to 233.6 m a.s.l.). Therefore, the camp-

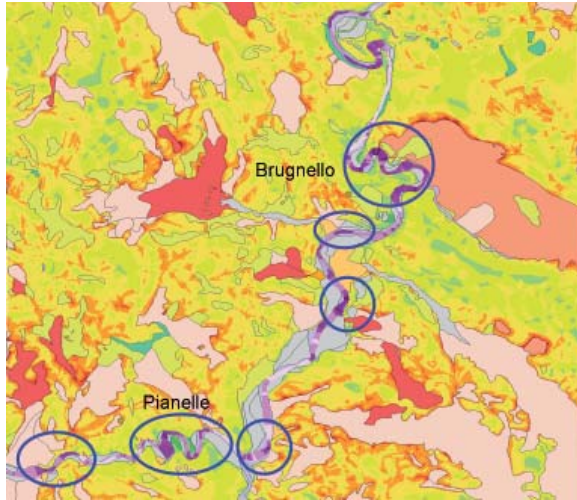


Fig. 11 - Sovrapposizione della carta di pericolosità con la carta dei dissesti e la distribuzione dell'indice di instabilità. Non sempre in corrispondenza di elevati indici di instabilità sono stati cartografati i dissesti (per esempio a Brugnello)  
 - Layering the landslides map and the distribution of the instability index. The map shows that where the instability indexes are higher, landslides are not always detected (for example at Brugnello)



Fig. 12 - Ampio dissesto presente in corrispondenza dell'abitato di Brugnello  
 - A large landslide is present near Brugnello

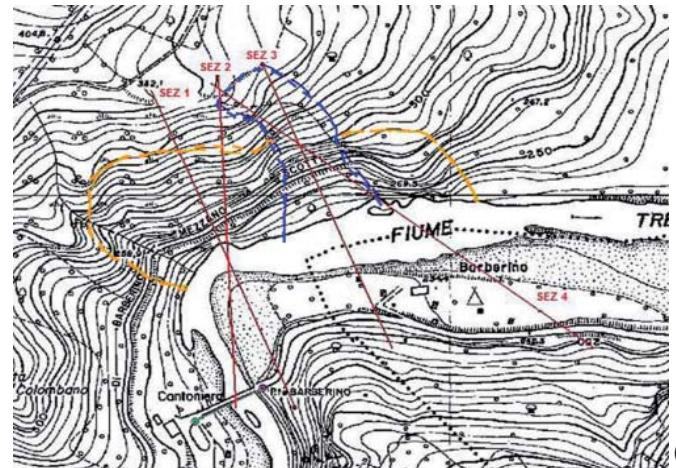


Fig. 13 - Frana di Barberino: (a) foto vista dall'alveo del Fiume Trebbia; (b) pianta; (c) sezione: in alcune formazioni sono riportate (con linee rosse, verdi, blu e azzurre) anche le principali famiglie di discontinuità rilevate in sito  
 - The Barberino landslide: (a) a view from the Trebbia River; (b) a plan view; (c) a cross-section: for some formations the main discontinuity set observed in the in situ survey are shown

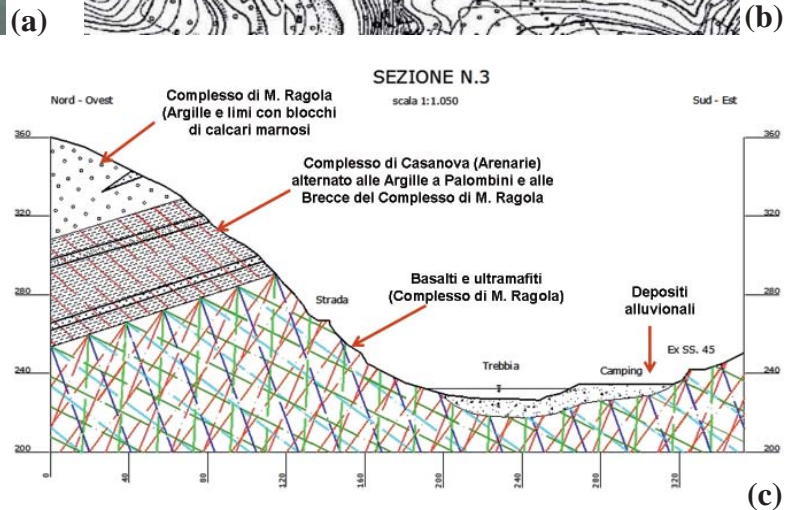




Fig. 14 - Dettaglio della frana di Barberino: crollo in roccia lungo la strada comunale  
 - *A detail of the Barberino landslide: the rock fall long the municipal road*



Fig. 15 - La frana di Barberino vista nel suo complesso  
 - *A view of the whole Barberin landslide*

Fig. 16 - Profilo idrico simulato in corrispondenza della frana di Barberino per l'evento del 2001  
 - *The simulated water surface just next to the Barberino landslide (November 2001)*

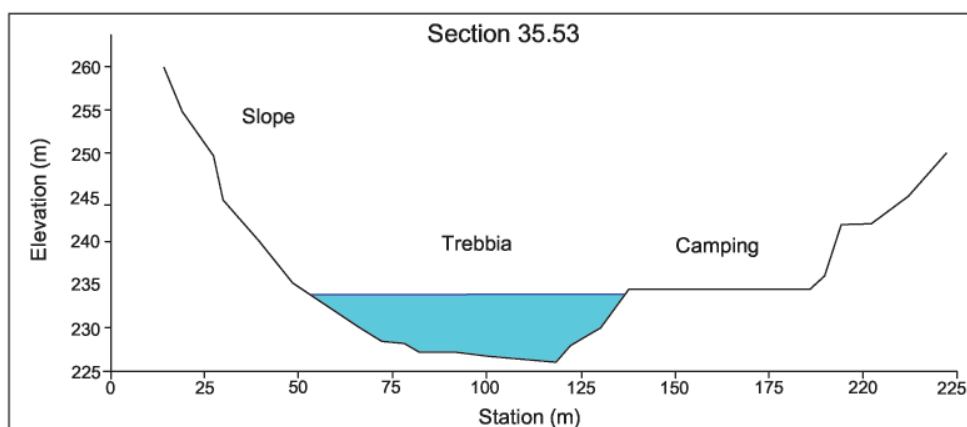


Fig. 17 - Erosione causata dall'alluvione del 2001 sulla sponda destra della gola di Barberino  
 - *Erosion produced by the 2001 flood on the right bank of the Barberino gorge*

a elevata pervasività, notevolmente tettonizzate e milonitizzate, tanto da poter essere considerate rocce deboli;

- colamento di terra sciolta (ultima riattivazione durante l'alluvione del 2001): la nicchia di distacco si trova ad una quota compresa fra i 370 e i 350 m s.l.m., dove sono presenti terre sciolte, limose-sabbiose, con blocchi di calcari marnosi, aventi dimensioni medie di circa 0.2 m<sup>3</sup>, e uno strato di breccia monogenica a matrice pelitica disposto a reggipoggio; il colamento ha sommerso parte delle rocce ultramafiche presenti nella parte medio-bassa del pendio (da circa quota 290 m s.l.m.) e la strada comunale (chiusa per frane dal 1990).

A testimonianza della dipendenza delle condizioni di stabilità del versante dalla dinamica fluviale si consideri l'evento alluvionale del 2001. In tale occasione, la portata al colmo della piena fu di circa 2350-2400 m<sup>3</sup>/s corrispondente ad un tempo di ritorno di circa 90 anni e ad una altezza idrometrica, presso la sezione fluviale della frana, di 7.4 m sopra il punto più depresso (corrispondente ad una quota di 233.6 m s.l.m.). Di conseguenza, il camping presente sul lato opposto del fiume (alla quota di 234.4 m s.l.m.), non è stato inondato, ma ha subito notevoli danni in seguito a fenomeni erosivi (Figg. 16 e 17). Infatti, sapendo che:  $\vartheta = 0.06$ ,  $d_{50} = 0.028$  m e  $\gamma_s = 25.51$  kN/m<sup>3</sup>, si è ricavata una  $u_{critica}$  pari a 0.163 m/s e quindi una  $\tau_{critica}$  di 26.4. Confrontando tale valore con gli sforzi tangenziali operati dalla corrente durante l'evento alluvionale del 2001 (variabili da 100 a 700 Pa, Tab. 3), si può comprendere perchè, a valle del ponte di Barberino, si siano avuti notevoli danni derivanti dall'erosione localizzata.

ing located on the opposite side of the landslides (at an altitude of 234.4 m) was not flooded, but was damaged by erosive phenomena (Fig. 16 and 17). Indeed, knowing that:  $\vartheta = 0.06$ ,  $d_{50} = 0.028$  m and  $\gamma_s = 25.51$  kN/m<sup>3</sup>, it is possible to calculate the  $u_{critical}$  equal to 0.163 m/s and the  $\tau_{critical}$  equal to 26.4 Pa. Comparing the latter value with the shear stress for erosion brought about by river flow during the flood event of the year 2001 (changing from 100 to 700 Pa, Tab. 3), it is possible to understand the reason why many damages caused by localized erosion occurred downstream the Barberino bridge.

Sezione Section	Quota fondo River bed altitude m s.l.m. / m a.s.l.	Quota acqua Water level m s.l.m. / m a.s.l.	Pendenza fondo River-bed gradient	Velocità media Average flow rate m/s	Area sezione bagnata Wetted area m <sup>2</sup>	Max larghezza Maximum width m	Sforzi tangenziali Share stress for erosion Pa
36	235.38	242.1	0.0021	3.24	786.7	166.0	98
35.1	226.83	236.9	0.0036	5.27	497.5	72.4	232
35	226.81	236.8	0.0034	5.41	482.8	72.2	239
34.995	Ponte di Barberino (ex SS 45)						
34.99	226.77	234.1	0.0155	8.55	301.8	68.9	691
34.9	226.74	234.0	0.0173	8.6	299.9	68.8	716
34.53	226.22	233.7	0.0058	6.05	436.1	83.6	322
34	223.45	229.5	0.0054	5.27	535.1	161.0	257
33.31	220.16	228.8	0.0028	3.8	711.1	174.8	134

Tab. 3 - Alcuni parametri idraulici relativi all'alluvione del 2001. Le sezioni 35.1 e 35 sono ubicate immediatamente a monte del ponte di Barberino, e riguardano rispettivamente l'inizio e la fine della contrazione del flusso determinato dal manufatto; le sezioni 34.99 e 34.9 sono ubicate immediatamente a valle del ponte, e riguardano rispettivamente l'inizio e la fine dell'espansione del flusso determinato dal manufatto; la sezione 34.53 è stata eseguita in corrispondenza della sezione geologica n. 3 (circa 300 m a valle del ponte); e la sezione 34 è posta poco a valle del camping

- Some hydraulic parameters concerning the flood of the year 2001. Sections 35.1 and 35 are located on the upstream side of Barberino bridge and they are related to the beginning and to the end of the flow contraction, arising from the presence of man-made works; sections 34.99 and 34.9 are located downstream the same bridge, and they are related to the beginning and to the end of the flow expansion; section 34.53 is located in correspondence to the geological section n. 3 (near 300 m downstream the bridge); and section 34 is located downstream the camping area

## CONCLUSIONI

Le complesse interazioni tra dinamica dei versanti e dinamica fluviale possono portare da un lato a fenomeni di instabilità che, seppure indipendenti dall'attività del corso d'acqua, possono avere effetti determinanti sull'evoluzione dell'alveo, dall'altro a fenomeni di instabilità innescati dall'azione fluviale.

Per valutare il rischio geologico conseguente e scegliere i sistemi di mitigazione più efficaci all'interno di un bacino idrografico, appare indispensabile definire in maniera quantitativa gli effetti dei diversi fattori idrologici (piogge critiche) e idraulici (altezze di piena e sforzi tangenziali) sulle condizioni di stabilità del versante. Tale approccio è valido se i dati di partenza (fondamentalmente le sezioni idrauliche) sono di qualità sufficiente a garantire una corretta ricostruzione della geometria dell'alveo. In caso contrario è meglio procedere con un'analisi qualitativa della morfologia fluviale e con la definizione di un indice di instabilità.

L'esempio presentato ha messo in evidenza che gli eventi di piena generano rilevanti sforzi tangenziali sul contorno bagnato, molto maggiori (oltre un ordine di grandezza) degli sforzi resistenti del materiale presente in alveo. Questo accelera moltissimo l'erosione e lo scalzamento al piede dei versanti; pertanto si può ipotizzare che il dissesto progredisca dal basso verso l'alto; infatti, nel caso in esame:

- i due versanti prospicienti il corso d'acqua sono costituiti dal medesimo tipo litologico, ma solo in sinistra idrografica, dove la direzione della corrente del Trebbia è quasi ortogonale al versante, si verificano i dissesti;
- l'erosione operata dal corso d'acqua al piede del versante determina la formazione di fratture di trazione parallele al pendio e al fiume;
- tali fratture di trazione determinano fenomeni di scivolamento planare di blocchi (1-10 dm<sup>3</sup>), nonostante le formazioni siano disposte a reggipoggio rispetto al versante.

Conoscere a priori la distribuzione degli sforzi tangenziali lungo i corsi d'acqua, o dei parametri morfologici legati all'indice di instabilità, unitamente all'ubicazione delle aree potenzialmente instabili prospicienti le sponde, consente di prevenire e mitigare i rischi di franamento.

Il prosieguo della ricerca sarà orientato, tramite un approccio integrato (idrologico, idraulico e geotecnico), alla valutazione dell'incidenza sulla stabilità dei versanti dei principali fattori idrologici: infiltrazione, filtrazione, variazione delle condizioni di saturazione, erosione al piede. L'obiettivo sarà quello di mettere in relazione, al variare dell'assetto geologico-strutturale e morfologico del versante, la distanza dalle condizioni di equilibrio limite con le caratteristiche della corrente fluviale.

## OPERE CITATE/ REFERENCES

- ANGELI M.G., MENOTTI R.M., PASUTO A. & SILVANO S. (1992) - *Landslides studies in the Eastern Dolomites Mountains, Italy*. Proc. of the VI Int. Symp. on Landslides, Christchurch, New Zealand, 10-14 February 1992 (Balkema, Rotterdam): 275-282.
- AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO (2001) - *Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)* - Gazzetta Ufficiale n.183 dell'8 agosto 2001.
- BENEDETTI A.I., DAPPORTO S., CASAGLI N. & BRUGIONI M. (2006) - *Sviluppo di un modello di previsione di frana per il bacino del fiume Arno*. Giornale di Geologia Applicata, **3** (2006): 181-188.
- BARTOLOMEI A., BRUGIONI M., CANUTI P., CASAGLI N., CATANI F., ERMINI L., KUKAVICIC M., MENDUNI G. & TOSONI V. (2006) - *Analisi della suscettibilità da frana a scala*

## CONCLUSIONS

The interactions between slope and fluvial dynamic are very complex. On the one hand, slope instability can play a determinant role in the river-bed evolution, also if it is unrelated to the river activity. On the other hand, river activities can trigger instability phenomena. Therefore, it is very important to quantify the effects of hydrologic (e.g. heavy rain) and hydraulic factors (e.g. flood plain from water surface elevation data, shear stress, etc.) on the slope stability conditions and, consequently, to evaluate the geological risk for choosing the most effective mitigation systems in a catchment basin.

This approach is correct if the data quantity and quality (especially the hydraulic cross sections) are sufficient to assure an accurate reconstruction of the river geometry. Otherwise, it is better to carry out a qualitative analysis of the river morphology and to use only the instability index.

The example showed above pointed out that the flood events can produce important shear stress for erosion on the wetted perimeter; these ones are over one order of magnitude higher than the strength stress of the river-bed sediments.

This phenomenon accelerates the erosion at the slope foot; therefore the landslide progresses from the bottom to the top. Indeed, in the illustrated example:

- the rocks constituting the slopes along the Trebbia river are of the same lithological kind, but it is possible to observe the landslides only where the Trebbia river flow direction is almost orthogonal the left slope;
- the stream erosion at the slope foot determines the development of tension cracks parallel to the river and to the slope;
- these tension cracks cause translational slides of rocks portion (1-10 dm<sup>3</sup>), despite the counter slope orientation of the Formations.

Therefore, to prevent and to reduce the sliding risk, it is very important to recognize the distribution of the shear stress along the rivers, the morphologic parameters linked to the instability index, and also to localize potential instability areas.

In the future, the research will try to quantify the effects of the hydrologic factors (like infiltration, filtration, saturated conditions changes, slide foot erosion) on the slope stability, improving the integrate approach (hydrologic, hydraulic and geotechnical) described previously.



- di bacino (Bacino del F. Arno, Toscana, Italia). *Giornale di Geologia Applicata*, **3** (2006): 189-195.
- BEZOARI G., BRAGA G., GERVAISONI S., LARCAN E. & PAOLETTI A. (1984) - *Effetto dell'estrazione di inerti sull'evoluzione dell'alveo del fiume Trebbia*, II Convegno di Idraulica Padana – Parma giugno 1984, parte **II**: 163-183.
- BONOMI C., FRANCANI V., GATTINONI P. & VILLA M. (2005) - *Il piping come fattore d'innescio del franamento: il caso di Stava*. *Quaderni di Geologia Applicata*, **12-2**: 41-56, Pitagora Editrice (Bologna).
- CHOW V.T. (1957) – *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Co.
- COROMINAS J. (2001) - *Landslides and climate*. 8th Int. Symp. on Landslides, **4**: 1-33.
- CORTOPASSI P., D'AMATO AVANZI G., GUIDOTTI M., MARCONI C., MILANO P.F., MUSSI M. & PUCCINELLI A. (2006) - *Approccio multidisciplinare per la valutazione della pericolosità da frana: indagini geologico-tecniche, idrogeologiche, geochimiche e isotopiche per la determinazione degli aspetti idrici sotterranei nella frana di Cassana in Val di Magra (Massa Carrara, Italia)*. *Giornale di Geologia Applicata*, **3**: 196-204.
- GATTINONI P. (2009) - *Parametrical landslide modeling for the hydrogeological susceptibility assessment: from the Crati Valley to the Cavallerizzo landslide (Southern Italy)*. *Natural Hazard*, **50**: 161-178.
- GILLON M.D. & HANCOX G.T. (1992) - *Cromwell Gorge landslides. A general overview*. Proc. of the VI Int. Symp. on Landslides, 10-14 February 1992 (Balkema) **1**: 83-120
- HAGERTY D.J. (1991) - *Piping – sapping erosion I: basic considerations*. *J. of Hydr. Eng.*, **117**: 991-1008.
- HUMBERT M. (1977) - *La cartographie ZERMOS. Modalités d'établissement des cartes de zones exposées a des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol*. *Bulletin Bureau Recherche Geologique et Mineraire*, **3**: 5-8.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (2002) - *Hec-Ras: User's Guide and Utility Programs Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis CA, 0-411
- IVERSON R.M. (1992) - *Sensitivity of stability analysis to groundwater data*. Proc. of the VI International Symposium on Landslides 10-14 February 1992. Rotterdam, Balkema.
- KAWABE H. (1992) - *On the influence of pore pressure on land deformation of a landslide*. Proc. of the VI International Symposium on Landslides, 10-14 February 1992. Rotterdam, Balkema.
- MASETTI M. (1999) - *Metodi di analisi dei rapporti tra la dinamica fluviale e dinamica dei versanti*. Atti della Giornata di studio "Rischio Geologico nella Provincia di Lecco", Politecnico di Milano, Centro per lo sviluppo del Polo di Lecco, 17-12-1998: 109-121.
- OLIVEIRA R. (1990) - *Weak rock materials, engineering geology of weak rock*, Proceedings of the 26<sup>th</sup> annual conference of the Engineering Group of the Geological Society, Leeds, United Kingdom, 9-13 September 1990, 5-15.
- REGIONE EMILIA ROMAGNA (2002) - *Carta dei dissesti*, a cura del Servizio Cartografico e Geologico della Regione Emilia-Romagna.
- RINALDI M. & SURIAN N. (2002) - *Variazioni morfologiche ed instabilità di alvei fluviali: metodi ed attuali conoscenze sui fiumi italiani (2002)* Atti Giornate di studio su Dinamica Fluviale, Ordine dei Geologi - Regione Marche, Grottammare (AP) Giugno 2002: 203-238.
- SCHUMM S.A., HARVEY M.D. & WATSON C.C. (1984) - *Incised Channels: morphology, dynamics and control*, Water Resources Publ., Littleton, Colorado, 200 pp.
- SHIELDS A. (1936) - *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, **26**: 5–24.
- SIMON A. (1989) - *A model of channel response in disturbed alluvial channels*. *Earth Surf. Process. Landforms*, **14**: 11-26.
- SIMON A. & DOWNS P.W. (1995) - *An interdisciplinary approach to evaluation of potential instability in alluvial channel*. *Geomorphology*, **12**: 215-232.
- SOGNI D. (2003) - *Evoluzione morfologica recente dell'alveo del tratto inferiore del fiume Trebbia*, tesi di laurea inedita, Università degli Studi di Milano - Bicocca.
- VARNES D.J. & IAEG (1984) - *The principles and practise of landslide hazard zonation*. UNESCO Press, Parigi, 63 pp.

Received February 2009- Accepted June 2009