

## MODELLI AD AUTOMAZIONE CELLULARE: UN'APPLICAZIONE AL CASO DELL'OCCLUSIONE D'ALVEO DE "LE MOTTACCE" (AR)

### CELLULAR AUTOMATA MODEL: AN APPLICATION TO LANDSLIDE DAM OF "LE MOTTACCE" (TUSCANY, CENTRAL ITALY)

CORRADO CENCETTI<sup>(\*)</sup>, PIERLUIGI DE ROSA<sup>(\*)</sup> & ANDREA FREDDUZZI<sup>(\*)</sup>

<sup>(\*)</sup> Università degli Studi di Perugia - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Via G. Duranti, 93 - 06125 Perugia, Italy  
E-mail: corcen@unipg.it

#### RIASSUNTO

Lo studio analizza il fenomeno delle occlusioni d'alveo per frana (landslide dams) tramite un approccio quantitativo che consiste nell'implementazione di uno specifico modello ad automazione cellulare: CAESAR, un modello 2D sviluppato per simulare le evoluzioni morfologiche di un fiume nel suo bacino idrografico, che include il calcolo del battente idrico e una più dettagliata rappresentazione del trasporto dei sedimenti utilizzando granulometrie multiple. La modificazione del codice è stata introdotta per simulare l'effetto di grandi quantità di materiale provenienti dai versanti che si immettono in un corso d'acqua (è questo il caso delle *landslide dams*).

Nella nota viene discussa una prima applicazione del modello CAESAR modificato ad un caso reale: la frana avvenuta il 27 novembre 1987 a "Le Mottacce" (bacino del fiume Arno). La frana, con un fronte di 100 metri, ha interrotto la ferrovia Arezzo-Stia e la strada provinciale adiacente, occludendo parzialmente il fiume per circa 2/3 della sua sezione di deflusso.

Il confronto tra il caso reale e il caso simulato dimostra che il codice CAESAR modificato può correttamente essere applicato per simulare il caso reale: la frana riprodotta nel modello causa una parziale occlusione del fiume (circa 2/3) e il corpo di frana si mobilita nello stesso modo in cui realmente si è mobilitato.

Inoltre, attraverso il codice di calcolo, vengono simulati differenti scenari, a breve e a lungo termine, per valutare la tendenza evolutiva del tratto di corso d'acqua interessato dal fenomeno franoso.

**TERMINI CHIAVE:** frane in alveo, modelli ad automazione cellulare, CAESAR

#### INTRODUZIONE

Il problema della modellistica dei fenomeni franosi che interferiscono con gli alvei fluviali fino alla loro parziale o totale occlusione è complessa, in quanto risulta difficile modellare un processo che coinvolge sia dinamiche di versante che dinamiche d'alveo (CENCETTI *et alii*, 2001; 2002; 2006) in un unico codice di calcolo.

Il modello CAESAR (COULTHARD *et alii*, 2002), opportunamente modificato (DE ROSA, 2008) risulta essere un codice di calcolo che risponde a tali esigenze. Lo scopo di questo lavoro è quello di testare tale codice di calcolo su un caso reale: la frana de "Le Mottacce", in

#### ABSTRACT

This study analyzes the phenomenon of landslide dams by means of a quantitative approach, that consists in the implementation of a specific cellular automata model: CAESAR (COULTHARD *et alii*, 2002) a 2D model developed to simulate the morphological trend of a river within its hydrographic basin, including the calculation of the flow depth and a more detailed representation of sediment transport using multiple grain sizes. A code modification of CAESAR (DE ROSA, 2008) has been introduced to simulate a large amount of sediments coming into the river from the slopes (i.e. landslide dams).

In this paper we present the first application of the modified CAESAR on a real case: the landslide occurred on 27<sup>th</sup> November 1987 in "Le Mottacce" (Upper Basin of Arno River). The landslide, which had a front of about 100 m, cut off both the Arezzo-Stia railways and the close provincial road and occluded the river-bed for 2/3 of its width.

The comparison between the real landslide and the performed simulation demonstrates that the CAESAR modified model can correctly simulate the real case: the landslide, simulated by the model, produces the partial blockage (about 2/3) of the river bed, and the landslide body moves in the same way that occurred in reality.

**KEY WORDS:** landslide dams, cellular automata models, CAESAR

#### INTRODUCTION

The problem of modelling mass movements interfering with fluvial river beds till their partial or total occlusion is complex, as it turns out difficult to model a process that involves both slope dynamics and river bed dynamics (CENCETTI *et alii*, 2001; 2002; 2006) in a single calculation code.

The CAESAR model (COULTHARD *et alii*, 2002), opportunely modified (DE ROSA, 2008), is a calculation code that satisfies such requirements. The aim of this job is to test such code on a real case: the landslide of "Le Mottacce", close to Capolona (province of Arezzo, in

località Capolona (provincia di Arezzo). Il codice di calcolo è stato utilizzato non solo per simulare il caso reale ma anche per valutare diversi scenari, al fine di valutare l'ipotetica evoluzione morfologica del sistema fluviale interessato dalla frana.

## IL MODELLO CAESAR

CAESAR è un modello di automa cellulare che usa una griglia regolare di celle rappresentanti il bacino o il tratto fluviale di studio (COULTHARD *et alii*, 2002; 2006; 2007). Ogni cella possiede alcune proprietà (per ogni cella vengono conservati in memoria diversi valori), quali l'elevazione, la portata idrica e il battente, la copertura vegetale, la profondità del bedrock e infine la granulometria del materiale che la costituisce. L'evoluzione del territorio si realizza, utilizzando il concetto di automa cellulare, tramite ripetute iterazioni di una serie di regole che vengono applicate su ognuna delle celle. Le regole utilizzate possono essere raggruppate in:

1. regole idrologiche;
2. regole di routing di portata;
3. regole di erosione e sedimentazione fluviale;
4. regole riguardanti i processi di versante (cioè quelle che simulano l'avvenimento del movimento franoso).

In pratica, per ogni iterazione, CAESAR modifica i valori delle proprietà della cella analizzata, in accordo con i set di regole appena elencati e con i valori delle proprietà delle celle adiacenti al passo temporale precedente. Ad esempio, la quantità di erosione fluviale di una cella può dipendere dal battente idrico della cella stessa e dalla pendenza tra questa cella e quelle adiacenti. CAESAR può funzionare sia a scala di bacino idrografico, sia a scala d'alveo (Coulthard *et alii*, 2007). A scala di bacino utilizza come input una pioggia oraria, costante su tutto il bacino, che si trasforma poi in portate defluenti attraverso l'utilizzo, come modello afflussi-deflussi, di TOPMODEL modificato (BEVEN & KIRKBY, 1979). A scala di tratto d'alveo, l'input è rappresentato dalle portate (solide e liquide) in ingresso.

Per le celle per cui è stato calcolato il battente, viene quindi calcolato il tasso di erosione e di sedimentazione fluviale, attraverso l'equazione di Wilcock e Crowe (WILCOCK & CROWE, 2003). Sono proprio i processi di presa in carico, trasporto e deposito dei sedimenti che modellano il territorio e determinano i cambiamenti morfologici. Infatti, una volta che il tasso di erosione/sedimentazione è calcolato, vengono aggiornati i valori di elevazione e granulometria per ogni cella del territorio modellato.

Per ulteriori dettagli, si rimanda ai lavori di COULTHARD *et alii* (2002) e di DE ROSA (2008).

## LA MODIFICA DEL MODELLO CAESAR

La modifica al modello CAESAR è stata possibile grazie al fatto che il codice sorgente è disponibile ([www.coulthard.org.uk](http://www.coulthard.org.uk)) e rilasciato sotto licenza GPL. Le modifiche apportate, che hanno interessato il set di regole riguardanti i processi di versante, non mirano a simulare il fenomeno franoso vero e proprio; si vuole piuttosto deter-

central Italy). The calculation code has been used in order to, not only simulate the real case, but to simulate various scenes, and estimate the hypothetical morphological evolution of the fluvial system affected by the landslide under different conditions.

## THE CAESAR MODEL

CAESAR is a cellular automata model that uses a regular grid of cells representatives of the river basin or the fluvial reach under study (COULTHARD *et alii*, 2002; 2006; 2007). Every cell has some properties (for every cell various values are stored in memory), such as the elevation, the water discharge and the hydric height of the current flow, the vegetational cover, the depth of bedrock and at last the grain size of the material. The landscape evolution is simulated using the concept of cellular automaton, by means of repeated iteration of a series of rules applied on every cell. The used rules can be grouped in:

1. hydrologic rules;
2. routing rules of discharge;
3. fluvial erosion and sedimentation rules;
4. rules regarding slope processes (i.e. rules that simulate the landslide).

Practically, for every iteration, CAESAR changes the properties values of the analyzed cell, in agreement with the set of rules listed above and with the properties values of the adjacent cells at the previous temporal step.

For example, the amount of fluvial erosion of a cell can depend on the height of water flow of the same cell and on the slope between this cell and the adjacent ones. CAESAR can work on the scale of catchment basin, or to river bed scale (Coulthard *et alii*, 2007).

At the river basin scale it uses as input an hour rain, constant on the whole river basin, that then changes in flowing discharges by means of a rains-flows model: the modified TOPMODEL (BEVEN & KIRKBY, 1979). At reach scale, the input is represented by the incoming discharges (solid and liquid).

For the cells for which the water level has been calculated, the rate of fluvial erosion and sedimentation is calculated, by means of the Wilcock and Crowe equation (WILCOCK & CROWE, 2003). The erosion, transport and sedimentation processes of material model the shape of the river and produce the morphological changes. In fact, after the rate of erosion/sedimentation has been calculated, the values of elevation and grain size for every cell of the modelled territory are updated.

For more details, see the papers of COULTHARD *et alii* (2002) and DE ROSA (2008).

## THE MODIFY OF THE CAESAR MODEL

The modification of the CAESAR model has been possible thanks to the fact that the source code is available ([www.coulthard.org.uk](http://www.coulthard.org.uk)) and released under licence GPL. The modifications have interested the set of rules regarding the slope processes and do not aim to simulate the mass movement; rather we intend to determine the answer

minare la risposta del sistema fluviale ad un forte apporto di materiale proveniente, appunto, da processi di versante. La modifica introdotta consente, quindi, di definire alcune celle in cui viene immesso materiale, secondo tempi e quantità desiderate.

La principale difficoltà consiste nel fatto che il time step che il modello usa non è fisso, ma variabile, in modo da simulare con maggiore dettaglio temporale i periodi di forti deflussi, e invece con passi più ampi le normali condizioni di deflusso; il materiale di frana, al contrario, deve essere immesso nel sistema secondo tempistiche che non si correlano al time step che in quel momento il modello utilizza. Inoltre il materiale immesso dai versanti deve possedere specifiche granulometrie e deve essere inserito in specifiche celle (ovvero in una determinata area del territorio che si vuole modellare - i.e. il piede della frana).

Le modifiche apportate, risolti i problemi della definizione della granulometria del materiale in ingresso e del passo temporale, permettono all'utente di creare un file di testo che definisce le caratteristiche del movimento franoso. Il file è costituito da più righe, una per ogni cella in cui si vuole immettere il materiale, contenenti ognuna 5 elementi: il primo ed il secondo definiscono la coordinata x ed y della cella dove si vuole immettere il materiale; il terzo e il quarto l'inizio e la fine del periodo di immissione (espresso in minuti); il quinto indica il volume totale in m<sup>3</sup> che viene immesso. Il modello CAESAR modificato è disponibile per il download all'indirizzo: [www.unipg.it/~pierluigi.derosa](http://www.unipg.it/~pierluigi.derosa).

Entrando nel dettaglio, il materiale viene immesso nelle celle che corrispondono all'incirca alle zone di accumulo della frana, tramite routine che consentono il conseguente movimento dei sedimenti verso valle (Fig. 1). Il materiale si muove, nelle iterazioni temporali successive, indipendentemente dalla tipologia di movimento franoso che lo ha originato, in base alle caratteristiche locali di pendenza, angolo di attrito del materiale e grado di saturazione.

Per ogni iterazione temporale viene immesso materiale nella cella specificata (ciò comporta, di conseguenza, un incremento di quota per la cella stessa) e, successivamente, si confronta il valore della pendenza locale con un valore limite dato dall'angolo di attrito, opportunamente diminuito in funzione del grado di saturazione del suolo calcolato da TOPMODEL (BEVEN & KIRKBY, 1979). Se la pendenza è maggiore

of the fluvial system to a high contribution of coming material from the slope. The modification allows us, therefore, to define some cells in which the material is introduced, according to times and amount desired.

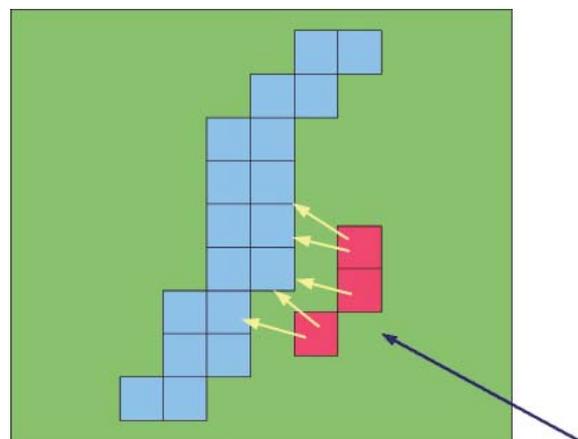
The main difficulty consists in the fact that the time step used by the model is not fixed, but variable, in order to simulate with greater temporal detail the periods of high discharge and with wider steps the normal conditions of outflow. The landslide material, on the contrary, must be introduced in the system according to a time that is not correlated to the time step used in that moment by the model. Moreover the incoming material from the slopes must have a specific grain size distribution and must be inserted in specific cells (that is a determined area of the territory to be modeled - i.e. the foot of the landslide).

The introduced modifications, after that the problems regarding the definition of the grain size of incoming material and the temporal step are resolved, allow the user to create a text file that defines the characteristics of the mass movement. The file is constituted by several rows, one for every cell in which you want to introduce the material, and every row contains 5 elements: the first and second define xy coordinates of the cell; the third and fourth, the beginning and the end of period of immission (expressed in minutes); the fifth indicates the total volume in m<sup>3</sup> that is introduced. The modified CAESAR model is available for download at website: [www.unipg.it/~pierluigi.derosa](http://www.unipg.it/~pierluigi.derosa).

In detail, the material is introduced into the cells corresponding to the landslide accumulation zones, by means of a routine permitting the consequent movement of sediments downstream (Fig. 1). The material moves, during the subsequent temporal iterations, independently from the type of mass movement that produces it, according to the local characteristics of slope, friction angle and degree of material saturation.

For every temporal iteration, material is introduced in the specific cell (this involves, consequently, an increment of elevation for the same cell). Successively, the value of the local slope is compared with a friction angle threshold, opportunely diminished according to the degree of saturation of the soil calculated by TOPMODEL (BEVEN & KIRKBY, 1979). If the slope is greater than the threshold, then a part of

Fig. 1 - Verso di movimento dei materiali "aggiunti" secondo le regole dei "processi di versante". La freccia blu indica la direzione del movimento franoso; i pixel colorati in celeste rappresentano le celle appartenenti al tracciato fluviale  
- Direction of movement of added material using the rules of slope processes. The blue arrow shows the main landslide direction; the cyan pixels correspond to the cells of the riverbed



del valore limite una parte del materiale viene mobilitato verso la cella immediatamente a valle: la quantità di materiale che viene spostata è limitata, poiché s'impone che la variazione di pendenza, per quel fissato time step, sia inferiore ad un valore limite fissato. In questo modo il movimento di massa avviene più lentamente (cioè impiegando più iterazioni per completare tutto il movimento) e in modo più naturale.

Una volta che tutto il materiale è stato movimentato, ma anche contemporaneamente al movimento stesso, CAESAR prosegue facendo evolvere il territorio in accordo con tutte le altre regole viste, modificando i valori di portata, profondità, granulometria e, di conseguenza, i valori dei tassi di erosione e sedimentazione.

### LA FRANA DE "LE MOTTACCE"

L'applicazione del modello CAESAR modificato è stata eseguita su un caso reale, quello della frana de "Le Mottacce", in provincia di Arezzo. Qui il 27 novembre 1987, dopo un lungo periodo di intense e frequenti precipitazioni, una frana interessò il versante destro della valle del F. Arno, occludendo parzialmente l'alveo (circa 2/3 della sezione di deflusso) con un fronte di circa 100 m. Notevoli furono i danni conseguenti al movimento franoso, tra cui l'interruzione della ferrovia Arezzo-Stia e della S.P. 58 "della Zenna" (Figg. 2-4). La frana, interpretata come rimobilizzazione di una porzione del corpo di una frana antica di più ampie dimensioni (CONVERSINI *et alii*, 1989,

the material is mobilized towards the cell immediately downstream: the amount of material that is moved is limited, since you impose that the slope variation, for a fixed time step, is inferior than a fixed value of threshold. Therefore the mass movement occur slower (i.e. employing more iterations in order to complete all the movement) and in a more natural way.

Once that all the material has been mobilized, but also at the same time of the mobilizing, CAESAR continues to evolve the territory in agreement with all the described rules, modifying the values of discharge, depth, grain size and, consequently, the values of the erosion and sedimentation rates.

### THE LANDSLIDE OF "LE MOTTACCE"

The application of the modified CAESAR model has been executed on a real case, the landslide of "Le Mottacce", in the province of Arezzo (Tuscany, central Italy), where in 27 November 1987, after a long period of intense and frequent rainfalls, a landslide affected the right bank of Arno river valley, occluding partially the river bed (approximately 2/3 of the outflow section) with a front of circa 100 meters. The consequent damages to the mass movement were remarkable: among these, the interruption of the Arezzo-Stia railroad and Provincial Road No. 58 "della Zenna" (Figg. 2-4). The landslide has been interpreted like a re-mobilization of a portion of the body of

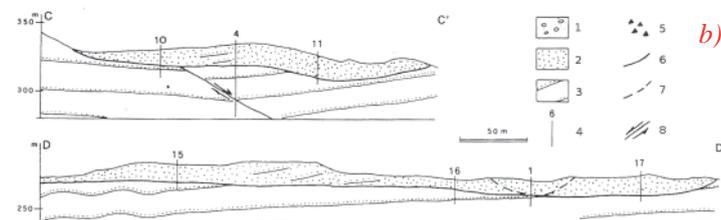
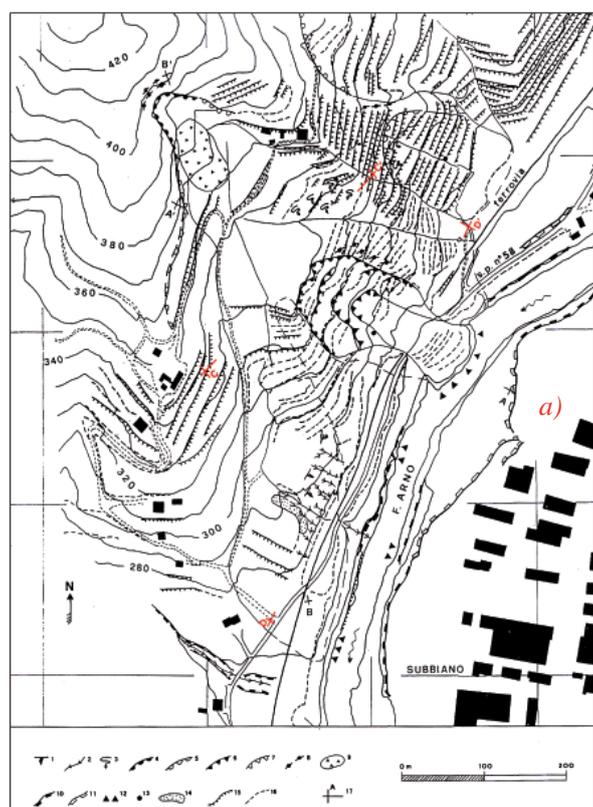


Fig. 2 - Carta geomorfologica (2a) e sezione (2b) della frana de "Le Mottacce" (da CONVERSINI *et alii*, 1989).  
 Legenda fig. 2a: 1) area interessata da ruscellamento diffuso; 2) fosso di ruscellamento concentrato; 3) area interessata da soliflusso generalizzato; 4) corona di frana attiva; 5) corona di frana quiescente; 6) gradino di frana attivo; 7) gradino di frana quiescente; 8) fratture di trazione; 9) corpo di frana di crollo; 10) scarpata di erosione fluvio-torrentizia attiva e 11) inattiva; 12) erosione di sponda; 13) sorgente; 14) emergenza temporanea d'acqua; 15) muretto a secco (terrazzamento agricolo); 16) scarpate e tagli di origine antropica; 17) traccia di sezione.  
 Legenda fig. 2b: 1) alluvioni attuali e recenti; 2) detrito di frana; 3) Formazione delle "Arenarie del Cervarola"; 4) sondaggi geognostici; 5) blocchi litoidi di notevoli dimensioni; 6) superficie di scorrimento della frana antica; 7) superficie di scorrimento della frana del novembre 1987; 8) faglia  
 - Geomorphological sketch and cross section of the landslide of "Le Mottacce" (by CONVERSINI *et alii*, 1989).  
 Legenda fig. 2a: 1) area affected by areal erosion; 2) gully; 3) area affected by solifluction; 4) crown of active landslide; 5) crown of quiescent landslide; 6) step of active landslide; 7) step of quiescent landslide; 8) tension fractures; 9) fall landslide body; 10) scarp of fluvial erosion, active and 11) inactive; 12) bank erosion; 13) spring; 14) temporary water spill; 15) small wall (agricultural terrace); 16) scarps due to human activities; 17) cross section line.  
 Legenda fig. 2b: 1) present and recent alluvial sediments; 2) landslide debris; 3) "Cervarola Sandstones" Formation; 4) geognostic boreholes; 5) large lithoid blocks; 6) ancient landslide sliding surface; 7) sliding surface of landslide occurred in November 1987; 8) fault



Fig. 3 - Il tratto d'alveo interessato dal movimento franoso de "Le Mottacce", ripreso immediatamente dopo l'evento (foto: Walter Dragoni)  
 - The reach of river bed affected by "Le Mottacce" landslide, taken immediately after the occurring of the event (photo by Walter Dragoni)

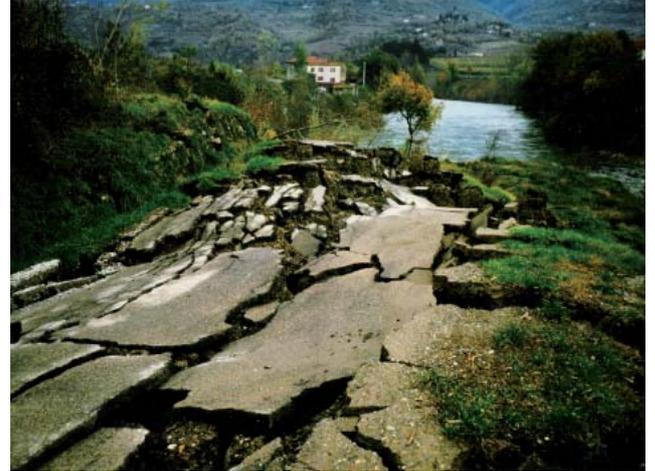


Fig. 4 - I danni alle vie di comunicazione, conseguenti al movimento franoso de "Le Mottacce" (foto: Walter Dragoni)  
 - The damages to the Arezzo-Stia railroad, consequent to mass movement of "Le Mottacce" (photo by Walter Dragoni)

1990), ha avuto come causa determinante l'azione di scalzamento al piede del versante prodotta dal fiume Arno che, anche attualmente, si trova in fase di incisione e di approfondimento dell'alveo. Infatti, considerata la bassa permeabilità del substrato roccioso, rappresentato dalla formazione flyschioide delle "Arenarie del Cervarola" si produce, in concomitanza di periodi di intense precipitazioni, l'imbibizione dell'antico corpo di frana, che risulta così più facilmente soggetto ad erosione da parte della corrente fluviale. L'allargamento sulla sponda opposta, in sinistra idrografica, è stato realizzato artificialmente, per permettere il regolare deflusso delle acque.

#### LA DEFINIZIONE DEI DATI DI INPUT PER LE SIMULAZIONI

Come già descritto in precedenza, CESAR è un codice di calcolo numerico che simula l'evoluzione morfologica di un territorio. Per poter eseguire le simulazioni è quindi necessario disporre di una serie di dati di input che devono essere opportunamente prodotti.

I dati di input richiesti sono: il modello digitale del terreno ante-evento; i dati di portata liquida del corso d'acqua del quale si vuole simulare l'evoluzione morfologica; il volume di materiale coinvolto dall'evento franoso che si è riversato nel corso d'acqua; la durata del fenomeno franoso; le caratteristiche geotecniche del materiale franato.

#### IL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO ANTE-EVENTO

Il principale dato di input è costituito dal modello digitale del terreno ante-evento franoso. In realtà, proprio a seguito dell'evento franoso de "Le Mottacce", come si è potuto constatare dal confronto tra le cartografie ante e post-evento, il fiume Arno ha subito una migrazione del tracciato in sponda sinistra di circa 30 metri.

Per la creazione del modello digitale del terreno ante-evento è

an ancient wider landslide (CONVERSINI *et alii*, 1989, 1990), and the cause can be identified in the action of erosion of the slope foot produced by River Arno that, even nowadays, is in a phase of undercutting and incision of the river bed. In fact, due to the low permeability of bedrock, represented by the formation of "Arenarie del Cervarola", in facies of flysch, at the same time periods characterized by intense rainfalls, the saturation of the ancient landslide body occurs, so that it was more easily affected by erosional processes by the fluvial stream. The widening on the opposite side, at hydrographical left, has been realized artificially, in order to allow regulating outflow of waters.

#### SIMULATIONS INPUT DATA

Like already described, CESAR is a numerical code calculation that simulates the morphological evolution of a landscape. In order to execute the simulations, it is therefore necessary to have a series of input data, opportunely produced.

The requested input data are: the digital terrain model before the event; the data related to the liquid discharge of the stream where we want simulate the morphological evolution; the volume of material involved by landslide moving towards the river bed; the duration of the mass movement; the geotechnical characteristics of the mobilized material.

#### THE DIGITAL TERRAIN MODEL BEFORE THE EVENT

The main input datum is represented by the DTM before-event. Due to the landslide of "Le Mottacce", as you can see comparing the maps produced before and post-event, the Arno river was affected by a migration of the river bed towards the left bank for approximately 30 meters.

In order to produce the digital terrain model before-event, the

stata utilizzata la Carta Tecnica Regionale della Regione Toscana fornita in formato vettoriale. Dalla cartografia sono state estratte le curve di livello con equidistanza 5 metri che sono poi state interpolate, tramite il modulo *v.surf.rst* di GRASS GIS, in un DEM con risoluzione di 5 metri al suolo.

Il modulo *v.surf.rst* utilizza come metodo di interpolazione la *regularized spline with tension* che approssima la superficie attraverso le funzioni *spline*, cioè funzioni costituite da un insieme di intervalli di polinomi di grado  $p$  raccordati tra loro. Lo scopo è interpolare, in un intervallo circoscritto, un insieme di punti (detti nodi della *spline*), in modo da creare una funzione continua (almeno fino ad un dato ordine di derivate) in ogni punto dell'intervallo. Mentre l'interpolazione lineare utilizza appunto una funzione lineare per ciascuno degli intervalli, l'interpolazione *spline* si serve dei suddetti intervalli di polinomi di grado piccolo (massimo terzo grado), scegliendoli in modo che due polinomi successivi si saldino in modo liscio (ammette derivate di qualsiasi ordine). La funzione che si ottiene con un procedimento di questo genere si chiama *funzione spline*. Il metodo delle *spline with tension* è comunemente ritenuto uno dei migliori algoritmi per interpolare superfici naturali che variano con gradualità, come appunto la topografia di un territorio (MITAS & MITASOVA, 1999).

Il DEM ottenuto con questa procedura, tuttavia, non inglobava anche l'alveo sommerso del corso d'acqua, poiché non erano fornite, nella cartografia utilizzata, informazioni relative al letto del fiume. Per ovviare a tale problema *in primis* è stato opportunamente modificato il DEM interpolato, con un abbassamento di 2 metri di quota delle celle appartenenti al corso d'acqua. Inoltre, poiché CAESAR scansiona le celle da sinistra verso destra, conseguentemente si richiede che il flusso scorra globalmente nello stesso senso. Poiché nel caso in questione la direzione di deflusso è orientata da N a S, è stata effettuata una rotazione del DEM di 90° in senso antiorario (Fig. 5).

Technical Regional Map of Tuscany Region was used, in vectorial format. From this cartography, contour lines were extracted in steps of 5 meters and interpolated, by means of *v.surf.rst* modul of GRASS GIS software, to produce a DTM with a resolution of 5 meters at ground.

The modul *v.surf.rst* uses, as interpolation method, the regularized spline with tension which approximates the surface by means of *spline* functions, i.e. functions constituted by an amount of intervals of polynomials of degree  $p$ , joined together. The aim is to interpolate, within a fixed interval, an amount of points (named "nodes" of the *spline*), in order to create a continuous function (until a determined order of derivatives) in every point of the interval. The linear interpolation uses a linear function for every interval; the *spline* interpolation, instead, uses such intervals of small degree polynomials (max third degree), by choosing them so that two successive polynomials joint them in "smooth" manner (it admits derivatives of every order). The obtained function with this kind of process is named *spline function*. The method of the *spline with tension* is generally considered one of the better algorithms to interpolate natural surfaces varying gradually, such as the topography of a landscape (MITAS & MITASOVA, 1999).

Nevertheless, the DTM obtained by means of this procedure didn't include also the submerged river bed, because the informations related to the river bed were not available in the used maps, the informations related to the river bed. In order to obviate to such problem, *in primis* the interpolated DTM has been opportunely modified, with a lowering of 2 meters of the elevation of the cells belonging to the watercourse. Moreover, since CAESAR scans the cells from left towards right, consequently is demanded that the flow moves all in the same direction. In the case, the direction of flow is oriented from N to S; therefore a rotation counterclockwise of DTM of 90 degrees was performed.

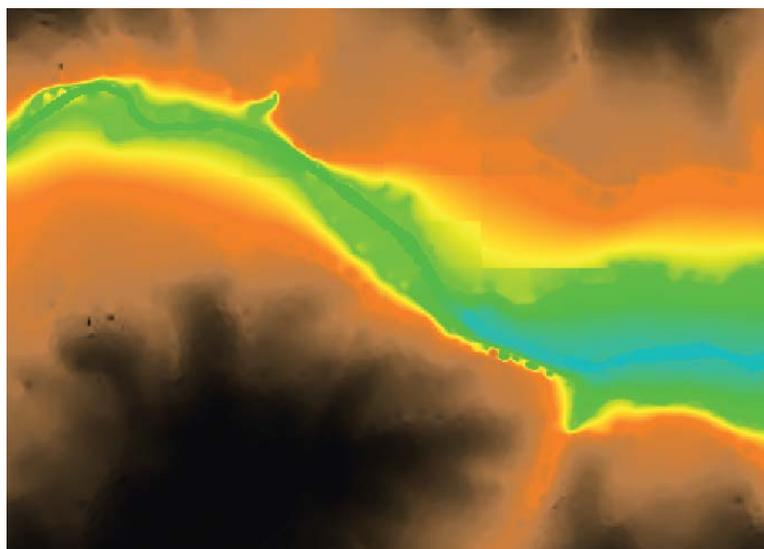
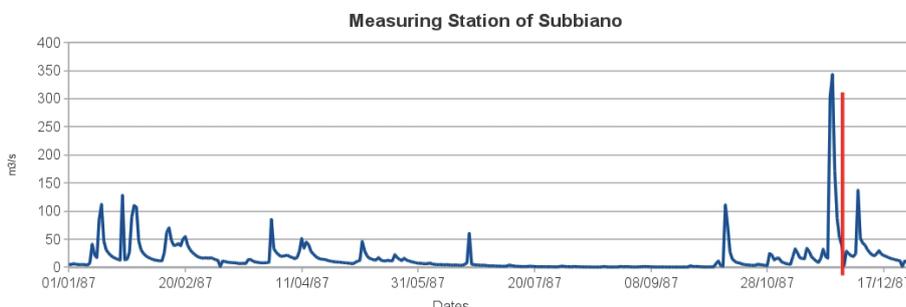


Fig. 5 - Modello digitale del terreno del tratto di Arno interessato dall'evento franoso, utilizzato per le simulazioni effettuate tramite CAESAR

- Digital Terrain Model of the reach of Arno River affected by the landslide, used for the simulations realized by CAESAR

Fig. 6 - Idrogramma giornaliero del 1987 relativo alla stazione di misura di Subbiano. La linea rossa indica la data dell'evento de "Le Mottacce"  
 - Daily hydrogram of 1987 referred to the measurement station of Subbiano. The red line points the date of "Le Mottacce" landslide event



$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>F</sub> (%)	USCS classification	$\phi$ (°)	c (Kg/cm <sup>2</sup> )
1,85 - 2,19	12 - 38	27 - 48	8 - 25	SC, CL, GR	18 - 27	0,1 - 0,7

Tab. 1 - Caratteristiche geotecniche del materiale di frana (da CONVERSINI *et alii*, 1989)  
 - Geotechnical characteristics of the landslide material (by CONVERSINI *et alii*, 1989)

**DATI IDROMETRICI**

Per la determinazione dei dati idrometrici per il tratto di Arno interessato dall'evento, si è fatto ricorso agli Annali Idrologici disponibili al sito web: [www.annali.apat.gov.it](http://www.annali.apat.gov.it) (UFFICIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO DI PISA, 1987). Negli Annali sono infatti disponibili le portate media giornalieri per il 1987 relative alla stazione di Subbiano, situata nelle immediate vicinanze dell'area di interesse (Fig. 2).

Dall'osservazione della figura 6 risulta evidente un picco di portata avvenuto nella seconda metà dell'anno. In particolare, il picco si verificò il 25 novembre 1987, mentre nella stazione di misura si registrava il passaggio di 343 m<sup>3</sup> medi giornalieri (appena due giorni prima dell'evento franoso di Capolona).

**DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL MOVIMENTO FRANOSO**

La conoscenza delle caratteristiche del movimento franoso è indispensabile per una corretta simulazione del fenomeno. Tuttavia, purtroppo, alcune delle informazioni necessarie non sono state reperite. In particolare, non è noto con precisione il volume di terreno mobilitato.

Invece le caratteristiche geotecniche del materiale franato sono state ottenute da prove di laboratorio su provini ricostruiti (CONVERSINI *et alii*, 1989). In tabella 1 sono riassunte le principali caratteristiche misurate, che sono state utilizzate sia per la determinazione dei volumi coinvolti, sia per la simulazione dell'interazione pioggia-portata.

**DETERMINAZIONE DEL VOLUME DI FRANA**

Al fine di individuare il volume di frana coinvolto nell'evento del novembre 1987, è stata effettuata una verifica della stabilità del versante 3D tramite un modello (sviluppato internamente al gruppo di ricerca degli autori della presente nota), totalmente integrato in GRASS GIS (MARCHESINI *et alii*, 2008). In realtà, essendo il modello in grado di eseguire anche verifiche bidimensionali, queste sono state entrambe eseguite. Per la verifica 3D l'algoritmo, poiché approssima

**HYDROMETRIC DATA**

In order to define the hydrometric data regarding the reach of Arno River affected by the landslide, we referred to Hydrologic Annals available at website: [www.annali.apat.gov.it](http://www.annali.apat.gov.it) (UFFICIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO DI PISA, 1987). In the Annals, the average daily discharges during 1987, related to Subbiano station, situated in the neighbouring of the studied area (Fig. 2) are available.

From the observation of figure 6, it is evident a peak of discharge occurred during the second half of the year. In particular, the peak occurred in 25 Novembre 1987, when in the gauging station 343 m<sup>3</sup> (average daily) were registered, just two days before the date of occurring of Capolona landslide.

**DETERMINATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE LANDSLIDE**

The knowledge of the characteristics of landslide is indispensable for a correct simulation of the phenomenon. Nevertheless, some of the necessary informations were not found. In particular, the accurate value of mobilized material volume is unknown.

Instead, the geotechnical characteristics of the same material were obtained by means of laboratory tests on reconstructed sample (CONVERSINI *et alii*, 1989). In table 1 the mean measured characteristics are reported; they have been used both for the determination of the involved volumes and for the simulation of the interaction between rains and discharge.

**DETERMINATION OF THE LANDSLIDE VOLUME**

In order to identify the landslide volume of material involved by the event of November 1987, a 3D stability analysis of the slope was carried out (developed by the research group of the authors of this paper), totally integrated in GRASS GIS (MARCHESINI *et alii*, 2008). Really, because the model is able to carry out also bidimensional checks, these were both carried out. For the 3D check, the algorithm rounds the slide surface as a ellissoidic surface; therefore

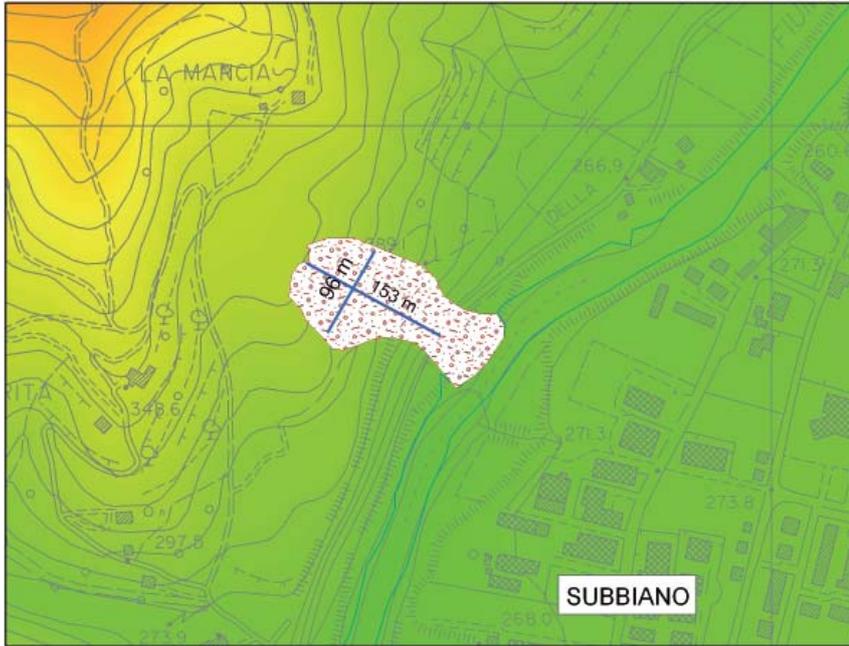


Fig. 7 - Definizione degli assi per l'analisi 3D della frana de "Le Mottacce"  
 - Definition of the axis for 3D analysis of the landslide of "Le Mottacce"

Asse C (metri)	FS
1	0,58
3	0,52
7	0,46
15	0,42
31	0,48
17	0,42

Tab. 2 - Report dell'algoritmo di ricerca del minimo fattore di sicurezza  
 - Report of algorithm used for the identification of minimum value of safety factor

F-values VS C-axis length: Point 2

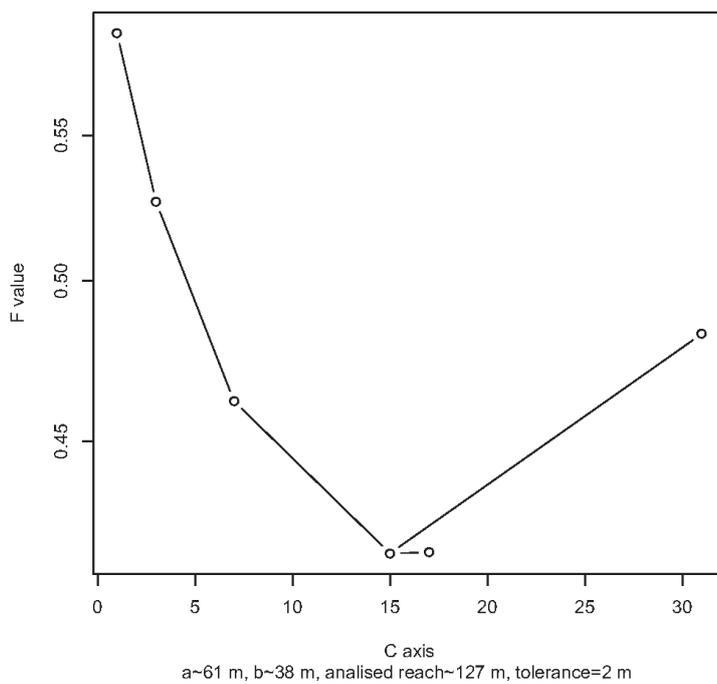


Fig. 8 - Andamento grafico dell'algoritmo di ricerca del minimo fattore di sicurezza per il modello di stabilità dei pendii 3D  
 - Graphic variation of the algorithm used for the identification of minimum value of safety factor for the 3D model of slope stability

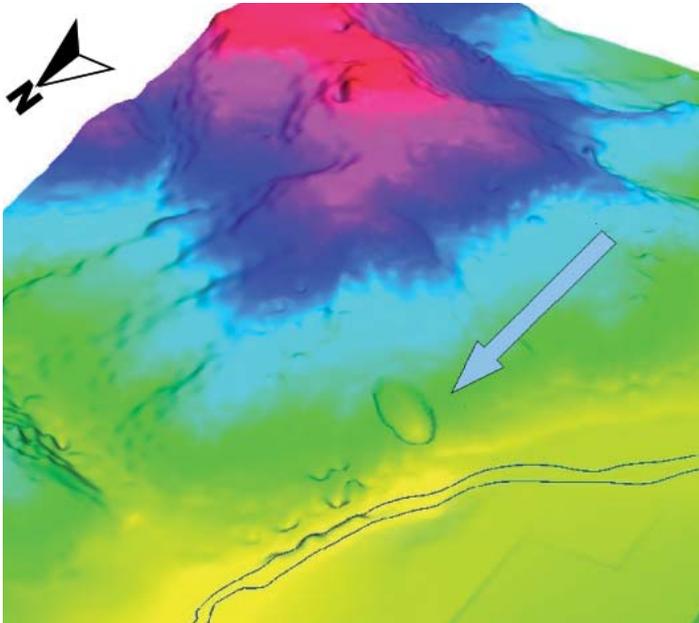


Fig. 9 - Rappresentazione 3D del DEM dell'area interessata dalla Frana de "Le Mottacce", nella quale viene evidenziata la superficie di scorrimento della frana  
 - 3D representation of the DEM of the area affected by the landslide of "Le Mottacce", where the sliding surface is highlighted

ASSE A	ASSE B	ASSE C	FS	VOLUME
61	38,4	15	0,41	88500

Tab. 3 - Caratteristiche dell'ellissoide con minimo FS. L'asse A e B identificano rispettivamente l'asse maggiore e minore in planimetria, mentre l'asse C rappresenta l'asse che, sviluppato in profondità, identifica sostanzialmente la profondità della superficie di scorrimento  
 - Characteristics of the ellipsoid corresponding to the minimum value of safety factor. The A and B axis identify respectively the major and minor axis in plain; the C axis represents the axis that, developed in depth, substantially identifies the depth of sliding surface

la superficie di scorrimento con un ellissoide, chiede in input di indicare l'asse principale (in planimetria) della frana ed il suo rapporto di anisotropia (rapporto asse maggiore / asse minore). Nel caso in esame, come si evince dalla figura 7, gli assi maggiore e minore della frana misurano rispettivamente 153 m e 96 m; di conseguenza, i parametri geometrici utilizzati nello script sono stati: semiasse maggiore a = 61 metri e rapporto di anisotropia = 0.63.

L'algoritmo, come ogni modello di stabilità dei pendii, cerca iterativamente l'ellissoide che fornisce il minimo fattore di sicurezza. Per il caso in questione, essendo note le caratteristiche della frana e volendo conoscere solo il volume della stessa, si è fatto variare solo il semiasse c, che identifica la profondità della superficie di scivolamento. Nel caso generale, ovviamente, è possibile far variare allo script anche il semiasse a. In tabella 2 e in figura 8 sono riportati gli output dello script per l'analisi 3D, che mostrano l'andamento del fattore di sicurezza al variare della profondità dell'ellissoide (semiasse c).

L'analisi 3D ha quindi individuato l'ellissoide che fornisce il minimo fattore di sicurezza; l'ipotetica superficie di scivolamento è riportata in Fig. 9.

Le caratteristiche dell'ellissoide sono invece riportate in tabella 3; i valori ottenuti sono stati quindi utilizzati per le successive simulazioni con CAESAR.

it requires the indication of the mean axis (in plain) of landslide and the anisotropy ratio (major axis / minor axis). In the case of matter, as can be seen in figure 7, the major and minor axis of landslide measure 153 m and 96 m respectively. Consequently, the geometric parameters used in the script were: major semiaxis = 61 meters and anisotropy ratio = 0.63.

The algorithm, like every model of slope stability, tries iteratively the ellipsoid that supplies the minimal safety factor. For the case of matter, being known the dimensions of the landslide and because we want to know only the volume of the landslide, only the semiaxis c, which identifies the depth of sliding surface, was varied. In a general case, obviously, it is possible exchange in the script also the semiaxis a. In table 2 and in figure 8 the output of the script for the 3D analysis are reported. They show the variation of safety factor with the variation of the ellipsoid depth (semiaxis c).

Therefore the 3D analysis identified the ellipsoid which supplies the value of minimum safety factor; the hypothetical sliding surface is shown in Fig. 9.

The characteristics of the ellipsoid are shown in table 3; the obtained values were used for the successive simulations through CAESAR.

## SIMULAZIONI EFFETTUATE

Come già ricordato, lo scopo principale del lavoro è quello di testare il modello su un caso reale, al fine di effettuare una sorta di validazione dello stesso. È stata posta quindi particolare attenzione alla corretta stima di tutti i parametri di input, in modo che fossero il più possibile congruenti con il caso reale de "Le Mottacce".

A seguito di questa prima esperienza, tuttavia, sono state anche effettuate simulazioni con lo scopo di poter fornire una risposta nel caso in cui non fosse avvenuto alcun intervento antropico di messa in sicurezza o nel caso in cui l'evento non fosse stato così rapido come effettivamente si è verificato in realtà. Questo ha quindi dato vita a due scenari, entrambi plausibili, che verranno meglio descritti e discussi in seguito.

### LA SIMULAZIONE DEL CASO REALE (EVENTO DEL 27 NOVEMBRE 1987)

Per la simulazione del caso reale sono stati utilizzati tutti i dati di input appena discussi, ovvero DEM ante-evento, caratteristiche geotecniche dei materiali (Tab. 1) e volume di frana, risultato pari a 88.500 m<sup>3</sup>, con le approssimazioni del caso, in quanto stimato tramite l'analisi di stabilità del versante. L'evento franoso di Capolona fu sostanzialmente molto rapido e si esaurì nel corso di qualche ora; tuttavia, dato che non sono noti con esattezza i tempi di durata del movimento franoso, nella simulazione fatta si è assunto che il fenomeno abbia avuto una durata di 3 ore complessive, periodo di tempo compatibile con le testimonianze orali raccolte. In figura 10 è mostrato il risultato della simulazione immediatamente dopo la fine del movimento franoso.

Come si evince dalla stessa figura, il codice di calcolo effettivamente mobilita il corpo di frana i cui sedimenti interferiscono con il corso d'acqua in maniera importante. Altra considerazione da fare è che il modello non prevede (almeno per poco tempo dopo la fine del movimento franoso) uno spostamento del corso d'acqua. Si nota infatti

## THE CARRIED OUT SIMULATIONS

Like already mentioned, the main aim of the work is to test the model on a real case, in order to carry out a kind of validation. Therefore, the corrected definition of all the input parameters was considered with particular attention, in order to make them the more congruent with the real case of "Le Mottacce" as possible.

Nevertheless, after this first experience, simulations were carried out with the aim of explain also the case in which any anthropic intervention could occur or the case in which the event could not be as fast as really occurred. This produces two scenarios, both plausible, that are after better described and discussed.

### THE SIMULATION OF THE REAL CASE (EVENT OF 27 NOVEMBER 1987)

For the simulation of the real case input data discussed above have been used, i.e. DTM before-event, geotechnical characteristics of material (Tab. 1) and landslide volume, estimated in 88.500 m<sup>3</sup> with the approximations of the case, because it was valued by means of the stability analysis of the slope. The landslide of Capolona was substantially very rapid and ran out in some hours; nevertheless, due to the absence of informations about the the real time of extending of landslides, in the simulation we assumed that the phenomenon lasted 3 hours, time period compatible with the collected oral confirmations. In figure 10 the result of the simulation immediately after the end of mass movement is reported.

As you can notice in the same figure, the calculation code really mobilizes the landslide body, whose sediments significantly interfere with the watercourse. Another consideration is that the model doesn't forecast (at least for a short time after the end of mass movement) a displacement of the river bed. In fact, you can notice that the water



Fig. 10 - Screenshot della situazione appena dopo la fine del movimento franoso (evidenziato in rosso). Si nota chiaramente come i sedimenti mobilitati dalla frana abbiano interferito con il corso d'acqua  
 - Screenshot of the situation immediately after the end of mass movement (highlighted by the red ellipse). You can note clearly the interference between the mobilized sediments and the watercourse

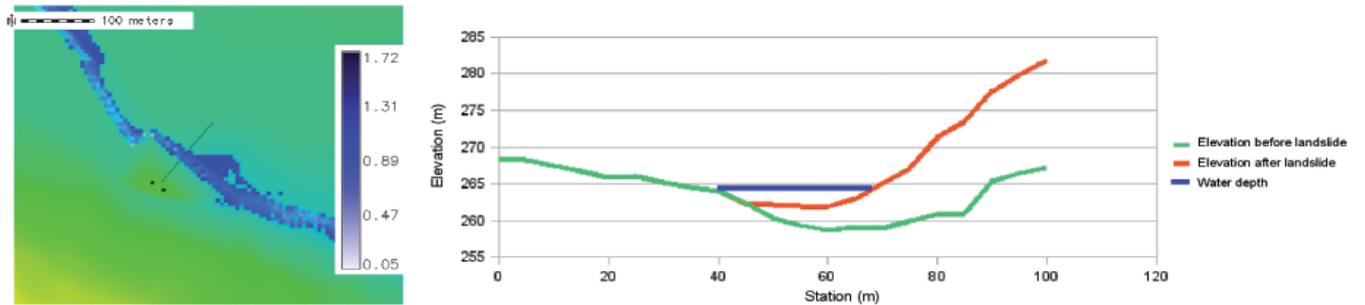


Fig. 11 - Analisi dei risultati della simulazione tramite GIS: a) mappa del tirante idrico con indicazione in planimetria della sezione trasversale A-B; b) sezione trasversale A-B con indicazione del tirante idrico a fine movimento franoso  
 - Analysis of the results of simulation through GIS: a) map of height of current flow, with the indication in plain of the A-B cross section; b) A-B cross section with the indication of height of current flow at the end of the mass movement

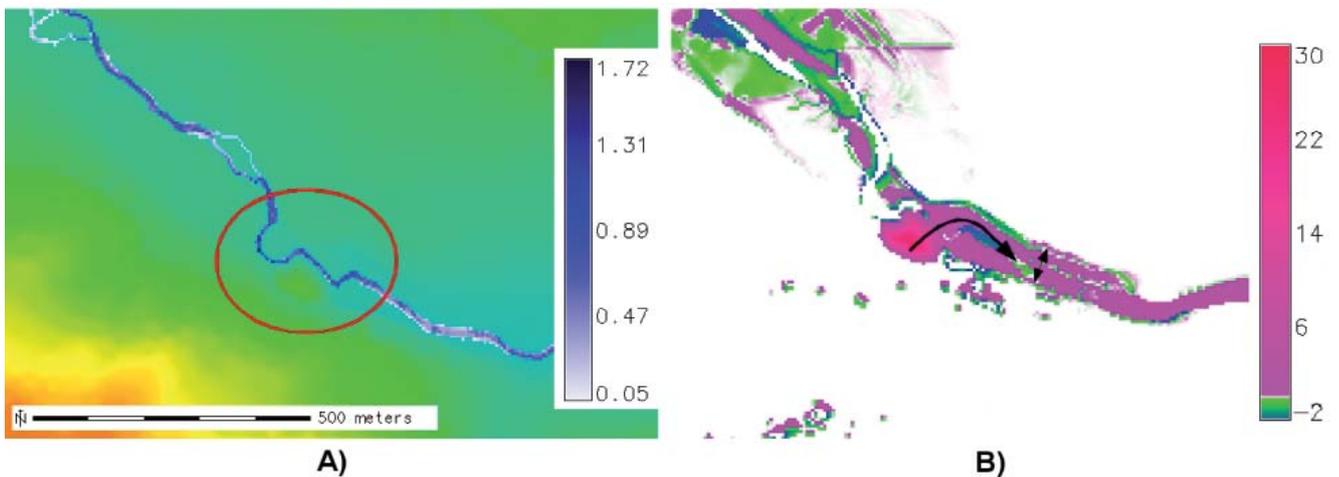


Fig. 12 - Output della simulazione dello scenario 1 dopo 4 mesi dalla fine della frana: a) modello digitale del terreno a fine simulazione con, sovrapposta, la mappa del tirante idrico; b) mappa delle differenze di quota tra la situazione a 4 mesi dall'evento franoso e la situazione ante-evento. I valori riportati in legenda sono espressi in metri  
 - Output of the simulation of scenario 1 after 4 months from the end of the mass movement: a) digital terrain model at the end of simulation with the superimposed map of the height of current flow; b) map of the differences of elevation between the situation 4 months after the end of mass movement and the situation before-event. The values in legenda are in meters

che le acque continuano a defluire nell'alveo anche a frana avvenuta, anche se la sezione di deflusso mostra una sensibile riduzione in larghezza. La figura 11 mostra più chiaramente questo aspetto: si nota, infatti, che il corpo di frana ha occluso per circa 2/3 il corso d'acqua in maniera del tutto simile a quanto accaduto in realtà (Fig. 11b).

**SCENARIO 1: COMPLETO ABBANDONO**

Lo scenario 1 è quello in cui è stata simulata l'ipotetica evoluzione del sistema, per un periodo di 4 mesi dopo l'avvenimento della frana, nel caso in cui non fosse stato effettuato (come invece è realmente accaduto) alcun intervento di sistemazione, messa in sicurezza e ripristino del corretto deflusso delle acque correnti. Lo scopo di analizzare questo scenario è nato appunto in considerazione del fatto che, a seguito della simulazione del caso reale, gli effetti a breve termine sono stati poco visibili. Attraverso questo scenario si è voluto comprendere

flows in the river bed also after the occurring of landslide, even if the flow section shows a considerable reduction in width. The figure 11 shows clearly this aspect: you can notice that the landslide body has occluded the river bed for about per 2/3 of the flow section, in a manner very similar to reality (Fig. 11b).

**SCENARIO 1: COMPLETE ABANDON**

The scenario 1 represents the hypothetical evolution of the system, for a time of 4 months after the occurring of the landslide, in the case in which any job to re-establish the correct flow of the water course couldn't be realized (like instead occurred). The aim of this scenario analysis has born because, after the simulation of the real case, the effects at a short time have been not much evident. Through this scenario you can so comprehend if the presence of the landslide body into the river bed could influence the natural evolu-

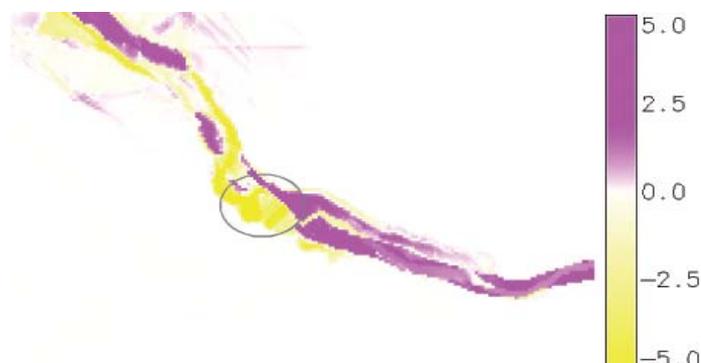


Fig. 13 - Confronto tra la situazione immediatamente dopo la fine del movimento franoso e la situazione a 4 mesi dalla fine dell'evento. I valori riportati in legenda sono espressi in metri

- Comparison between the situation immediately after the end of mass movement and the situation at 4 months after the end of the event. The values in legenda are in meters

quanto la presenza del corpo di frana all'interno del corso d'acqua avrebbe potuto influenzare la naturale evoluzione del sistema.

In figura 12 è mostrato l'output ottenuto da codice di calcolo per la simulazione dello scenario 1. In figura 12a, dove è riportato il battente idrico sovrapposto al modello digitale del terreno, si nota chiaramente la presenza del corpo di frana al centro del cerchio rosso e come il normale deflusso delle acque abbia subito una migrazione a seguito proprio dell'ostacolo rappresentato da questi sedimenti. In figura 12b il confronto tra la situazione precedente all'evento e quella dopo 4 mesi dallo stesso, effettuata attraverso una operazione di algebra tra mappe, evidenzia come il materiale depositato in alveo per effetto della frana sia stato poi parzialmente mobilitato verso valle (seguendo il percorso della freccia nera curva). Tale materiale ha sostanzialmente modificato le caratteristiche del corso d'acqua che, subito a valle del punto in cui è avvenuta la frana, inizia a presentare caratteri braided proprio a causa di questa grande quantità di sedimenti immessi nell'alveo.

Per meglio comprendere il nuovo comportamento assunto dal corso d'acqua a seguito dell'evento franoso, è stato eseguito un confronto, sempre tramite operazioni di map algebra, tra la situazione immediatamente dopo la fine del movimento franoso e la situazione a 4 mesi (Fig. 13). All'interno dell'area evidenziata si nota come, dopo 4 mesi, la zona in colore giallo abbia subito un abbassamento di quota a seguito della movimentazione del materiale di frana verso valle (area in colore magenta) e come il corso d'acqua, all'interno del materiale da lui stesso depositato in alveo a valle della frana, abbia prodotto la formazione di 3 canali per il deflusso delle acque, assumendo un tracciato braided, in cui il canale principale, ben visibile in Fig. 13, è quello che porta alla nuova configurazione idraulica del fiume mostrata in Fig. 12a.

#### SCENARIO 2: FRANA LENTA

Lo scenario 2, definito di "frana lenta" è quello in cui è stato considerato il caso in cui la frana fosse avvenuta con minore velocità. È stata eseguita una simulazione dove, partendo sempre dalla situazione iniziale (DEM ante-evento) si è simulato il movimento franoso che ha mobilitato i circa 88.000 m<sup>3</sup> coinvolti, attraverso un intervallo temporale di 4 mesi.

La figura 14 mostra il risultato della simulazione di questo sce-

tion of the system.

In figure 12 the output obtained by the calculation code for the simulation of scenario 1 is shown. In figure 12a, where the height of the current flow superimposed to the digital terrain model is represented, you can note clearly the presence of the landslide body in the centre of the red circle; the normal flow of the water has suffered a migration, due to these sediments that acted as obstacle. In figure 12b the comparison between the before-event situation and the after 4 months one, performed through a map-algebra operation, shows instead that the material in the river bed has been partially mobilized downstream (following the black curve arrow). Such material produced a modification of the characteristics of the stream which, just downstream with respect to the point in which landslide occurred, has begun to assume braiding characteristics, due to the great amount of sediments in the river bed.

In order to better comprehend the new behaviour of the stream after the mass movement, a comparison was carried out, always through map-algebra operations, between the situation immediately after the end of mass movement and the situation 4 months after the event (Fig. 13). Inside the highlighted area you can note that the yellow zone, after 4 months, has suffered a lowering of elevation, due to the mobilization of landslide material downstream (area in magenta) and the watercourse, inside the sedimented material by the river itself, has produced the formation of 3 channels used for the flow of current water, assuming a braided course, where the main channel, well visible in Fig. 13, is the same that produces the new hydraulic configuration shown in Fig. 12a.

#### SCENARIO 2: SLOW LANDSLIDE

The scenario 2, named "slow landslide" considers the case of landslide with minor velocity of movement. A simulation was carried out where, starting from the originary situation (DTM before-event) the mass movement mobilizing about 88.000 m<sup>3</sup> of material, lasted 4 months.

The figure 14 shows the result of the simulation of such scenario. Also in this case you can observe that the inserted material, even if

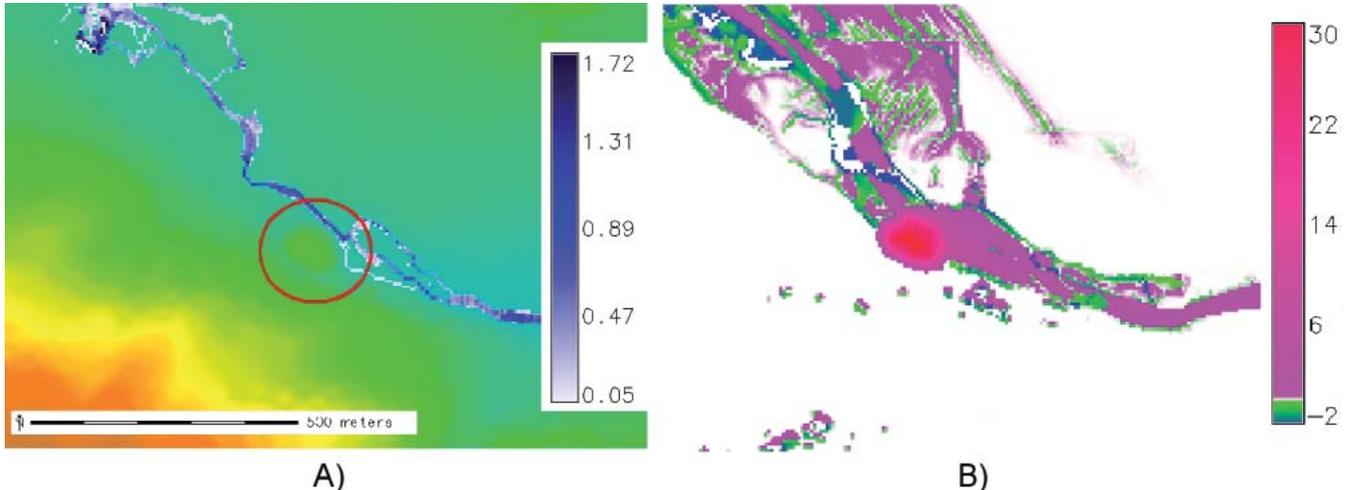


Fig. 14 - Output a fine simulazione dello scenario 2: a) modello digitale del terreno con evidenziato il corpo di frana con, sovrapposta, la mappa del tirante idrico dal quale si evince chiaramente il maggior intrecciamento assunto dal tracciato del corso d'acqua; b) mappa della differenza di quota tra il DEM a fine simulazione e il DEM ante-evento

- Output at the end of simulation of scenario 2: a) digital terrain model where the landslide body is highlighted with the map of the height of current stream superimposed. You can note the braiding behaviour assumed by the watercourse; b) map of the difference of elevation between the DTM at the end of simulation and the DTM before-event

nario. Anche in questo caso si osserva come il materiale immesso, seppur con una velocità molto minore, abbia comunque ostacolato il normale deflusso delle acque generando un comportamento del fiume a canali multipli. La figura 14b mostra come siano poi stati movimentati i sedimenti immessi fornendo un risultato del tutto simile a quanto ottenuto per lo scenario 1.

In sostanza si può affermare che, dai risultati del codice di calcolo, l'aver diminuito la velocità del movimento franoso non ha cambiato il comportamento globale del sistema, ovvero la velocità di frana non è risultato essere un fattore determinante o, allo stesso modo, che il corso d'acqua non ha una sufficiente stream power tale da poter allontanare tutti i sedimenti apportati dal movimento franoso.

Sono stati eseguiti due trasversali, il primo (A-B) posto in corrispondenza del punto in cui è avvenuto il movimento franoso e il secondo (C-D) poco a valle. In figura 15, nelle sezioni eseguite, si nota appunto come: i) nella sezione A-B si è verificata una parziale occlusione dell'alveo, anche se il materiale è stato immesso più lentamente; ii) nella sezione C-D, l'alveo attivo precedente l'evento è stato completamente interrato ed è scomparsa la morfologia monocanale; inoltre, il canale principale ha subito una traslazione e il tracciato del fiume assume una morfologia di tipo braided.

## CONCLUSIONI

Il risultato principale di questo lavoro, il cui scopo era quello di testare il modello sviluppato su un caso reale, consiste nel fatto che la simulazione effettuata ex post ha prodotto una situazione del tutto congruente con quanto accadde in realtà il 27 novembre 1987 a Capolona. Questo risultato qualitativo (anche se il codice di calcolo

with minor velocity, obstacles the normal flowing of the current water, producing a behaviour of the river multichannel. The figure 14b shows that the inserted material had been mobilized, producing a result very similar to the scenario 1.

Therefore, we can say that, from the results of the calculation code, the decreasing of the mass movement velocity didn't change the global behaviour of the system. So the velocity of the landslide doesn't seem to be a decisive factor, i.e. the watercourse has not sufficient stream power to mobilize all the sediments brought by the mass movement.

Two cross sections were carried out: the first one (A-B) is situated close to the point where the landslide occurred; the second one (C-D) immediately downstream. In figure 15, in the same cross sections, you can notice: i) in the A-B section a partial occlusion of river bed occurred, even if the material was introduced slower; ii) in the C-D section, the active river bed before the event was completely buried and the single-channel morphology disappeared; moreover, the main channel was affected by a traslation and the stream assumed a braided morphology.

## CONCLUSIONS

The main result of this work, whose aim was to test the model on a real case, is that the carried out ex post simulation produced a situation congruent with the real situation occurring in 27 November 1987 at Capolona. This qualitative result (even if the calculation code produces over all quantitative results), is extremely important, over

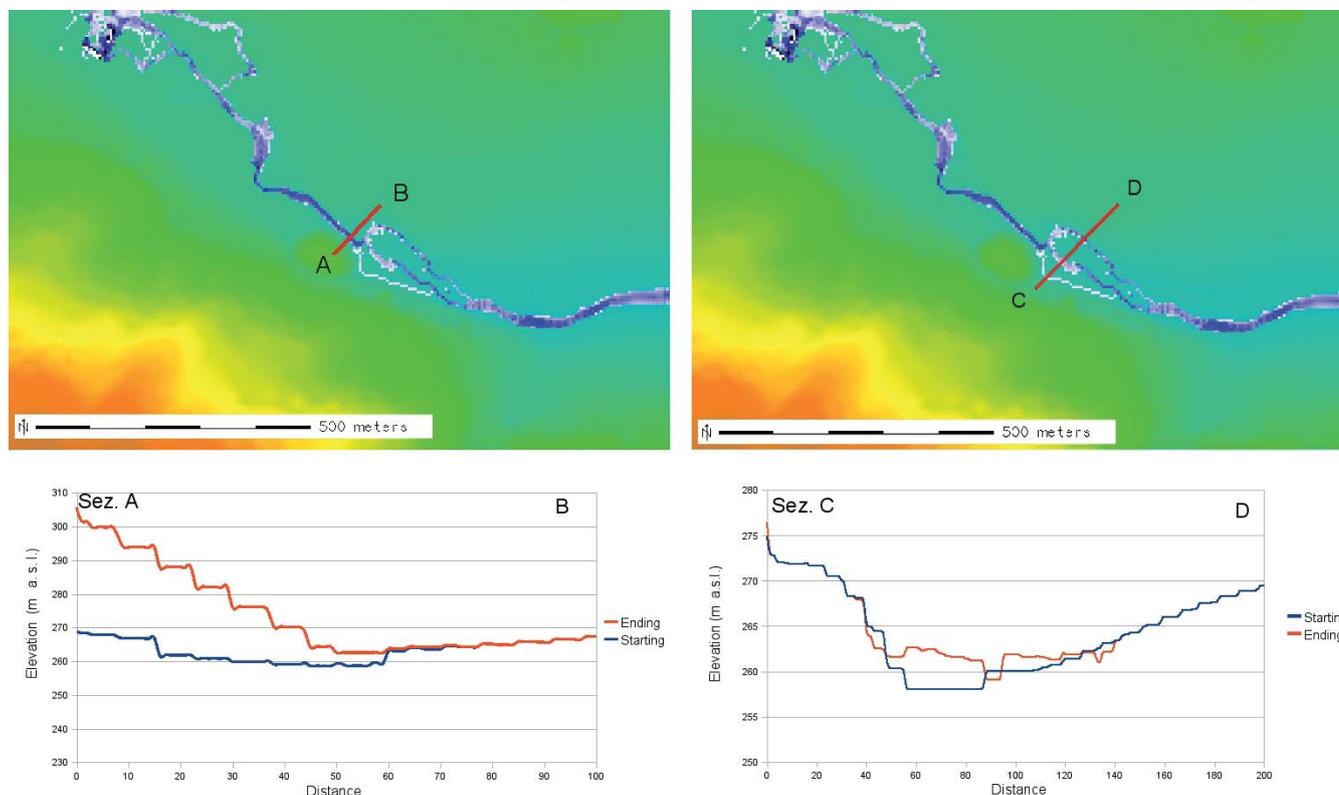


Fig. 15 - Traccia delle due sezioni trasversali A-B (in corrispondenza del corpo di frana) e C-D (poco a valle del corpo di frana) con rappresentazione della sezione trasversale *ante* e *post-evento* franso  
 - Trace of the two cross sections A-B (close to the landslide body) and C-D (immediately downstream) with the representation of the cross section before and post-event

fornisce soprattutto risultati quantitativi), è di per sé già estremamente importante, soprattutto perché, in tali approcci modellistici, è il risultato geomorfologico generale che deve essere valutato.

Due ipotetici scenari (quello di “completo abbandono” e quello di “frana lenta”) sono stati analizzati a seguito della prima simulazione eseguita, e quindi una volta che il codice di calcolo era già stato testato. Per entrambi gli scenari simulati, CAESAR ha individuato una importante modifica del comportamento del fiume a valle della sezione in cui la frana ha interferito con il corso d’acqua, dove il fiume ha assunto un tracciato multicanale (*braided*). Tale variazione morfologica del tracciato fluviale è sicuramente da imputare all’enorme quantità di sedimenti riversati in alveo dal movimento franoso che la corrente fluviale non è riuscita a mobilitare, neanche nel caso dello scenario 2 (ovvero quello di “frana lenta”). Questo è sicuramente uno degli aspetti più interessanti: il fattore “velocità” del movimento franoso, considerando la morfologia del territorio, le portate e le caratteristiche del corso d’acqua, non risulta essere un fattore significativo in relazione al risultato finale della simulazione. In ogni caso, tuttavia, si può affermare che entrambi gli scenari simulati hanno fornito risultati plausibili e attendibili.

all because, in such modellistic approaches, the general geomorphological result has to be valued.

Two hypothetical scenarios (one of “complete abandon” and the other of “slow landslide”) were analyzed after the first carried out simulation, and therefore after the calculation code was tested. For both simulated scenarios, CAESAR individuated an important modification in the behaviour of the watercourse downstream the cross section where the landslide interfered with fluvial river bed and the watercourse has assumed a braided morphology. Such morphological variation of the stream is surely produced by the enormous amount of material introduced in the river bed that was not mobilized by the current flow, not even in the case of scenario 2 (i.e. “slow landslide”). This is surely one of the most interesting aspect: the factor “velocity” of mass movement, considering the morphology of landscape, the liquid discharge and the characteristics of the river bed, doesn’t seem to be a significant factor if related to the final result of simulation. Nevertheless, we can say that both simulated scenarios produced plausible and reliable results.

Another important consideration is that the model is able, us-

Una considerazione importante è quella che il modello riesce, utilizzando le dovute semplificazioni intrinseche al modello stesso, ad affrontare una tematica così complessa che interessa sia la dinamica d'alveo che quella di versante e le interazioni tra esse. Ad oggi pochi sono i simulatori che trattano tale problematica, soprattutto a causa della complessità del problema. Tutto ciò depone sicuramente a favore del modello CAESAR modificato.

Al termine di questo lavoro sono comunque emersi alcuni aspetti dubbi che è necessario sottolineare. In primo luogo, il fattore velocità della frana: lascia qualche dubbio la considerazione che tale parametro effettivamente influenzi poco il comportamento globale del sistema. Tale problematica necessiterebbe di più approfonditi studi e valutazioni.

Altro aspetto da considerare riguarda i tempi di calcolo: un codice così implementato, che può variare il time step per il controllo delle instabilità numeriche, richiede una notevole potenza di calcolo e i tempi per effettuare anche una sola simulazione sono lunghi. La simulazione dello scenario 2, ad esempio, ha richiesto circa 30 ore di calcolo.

Esiste poi un terzo problema, non propriamente collegato al modello in sé, ma che riguarda il difficile reperimento di alcuni dati di input (es. le granulometrie di fondo e i dati sul trasporto solido).

A valle di queste considerazioni, è però possibile affermare che il risultato complessivo ottenuto è sicuramente positivo e che CAESAR modificato può essere efficacemente utilizzato come modello per la simulazione delle interferenze tra le dinamiche d'alveo e le dinamiche di versante.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Prof. Walter Dragoni, del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Perugia, per aver gentilmente concesso la riproduzione delle immagini da lui stesso riprese dopo l'evento franoso de "Le Mottacce", durante un sopralluogo di primo intervento per la messa in sicurezza dell'area interessata dalla frana.

## OPERE CITATE / REFERENCES

- BEVEN K.J. & KIRKBY M.J. (1979) - *A physically based variable contributing area model of basin hydrology*. Hydrologic Science Bulletin, **24** (1): 43-69.
- CENCETTI C., CONVERSINI P., RIBALDI C. & TACCONI P. (2001) - *Studio dei sistemi alveo - pianura fluviale in relazione alle interazioni con fenomeni franosi di versante*. Mem. Soc. Geol. It., **56**: 249-263, 8 ff., 4 tabb. ISSN: 0375-9857.
- CENCETTI C., CONVERSINI P., MARCHESINI I., RIBALDI C. & TACCONI P. (2002) - *Pericolosità dei fenomeni franosi che interferiscono con i sistemi alveo-pianura fluviale: un approccio probabilistico*. Quaderni di Geologia Applicata - Serie AIGA (It. Journ. of Eng. Geol. and Env.), **1**: 49-60. ISSN: 1593-8433.
- CENCETTI C., FREDDUZZI A., MARCHESINI I., NACCINI M. & TACCONI P. (2006) - *Some considerations about the simulation of the breach channel erosion on landslide dams*. Computational Geosciences, Springer, **10**: 201-219. ISSN (Paper): 1420-0597 - ISSN (Online): 1573-1499 - doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10596-005-9019-x>.
- CONVERSINI P., PERUZZI R. & TACCONI P. (1989) - *La frana delle Mottacce nell'alveo del fiume Arno: inquadramento ed analisi preliminare*. Atti del Convegno "Studio Centri Abitati Instabili" (Portonovo di Ancona, 10-12 maggio 1989): 147-154.
- CONVERSINI P., PERUZZI R. & TACCONI P. (1990) - *The landslide of "Le Mottacce" in the river-bed of the Arno River*. In: PRICE D.G. (Editor) - Proc. of 6th International Congress of IAEG (Amsterdam, Netherlands, 6-10 August 1990): 1555-1563.
- COULTHARD T.J., MACKLIN M.G. & KIRKBY M.J. (2002) - *A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution*. Earth Surface Processes and Landforms, **27**: 269-288.
- COULTHARD T.J., HICKS D.M. & VAN DE WIEL M.J. (2007) - *Cellular modelling of river catchments and reaches: Advantages, limitations and prospects*. Geomorphology, **90** (3-4): 192-207.
- COULTHARD T.J. & VAN DE WIEL M.J. (2006) - *A cellular model of river meandering*. Earth Surface Processes and Landforms, **31**: 123-132.
- DE ROSA P. (2008) - *Un approccio modellistico per il fenomeno delle occlusioni d'alveo per frane: una modifica al modello Caesar*. Giornale di Geologia Applicata,

ing the necessary simplifications intrinsic to itself, to approach a so complex theme interesting both the dynamic of the river bed, and the slope dynamics and the interference between them. At the present the simulators dealing with such problem are not many, overall due to its complexity. All this counts for the modified CAESAR model.

At the end of the note, some doubtful aspects have stand out which need to be underlined. At first, the factor velocity: the consideration that such parameter could little influence the global behaviour of the system leaves some doubts. This problem needs more in-depth studies and analysis.

Another aspect to consider is related to the times of calculation: a so implemented code, which can vary the time step for the control of numerical instabilities, requires a strong power of calculation and the time for carry out even one simulation are too long. The simulation of scenario 2, for example, required about 30 hours for calculation.

A third problem, not properly related to the model itself, regards the difficulty in finding some input data (for example the grain size of the bottom and the data about solid transport).

In spite of these considerations, we can assert that the obtained comprehensive result is surely good and that the modified CAESAR can be effectively used as model for the simulation of interferences between fluvial dynamics and slope dynamics.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish thank Prof. Walter Dragoni (Department of Earth Sciences, University of Perugia) for kindly conceding the reproduction of his photos, taken after the occurring of "Le Mottacce" mass movement, during an inspection for the first aid in the area affected by landslide.

8 (2) : 277-284 - doi: 10.1474/GGA.2008-08.2-23.0195.

MARCHESINI I., CENCETTI C., DE ROSA P. (2008) - *A Preliminary method for the evaluation of the landslides volume at a regional scale*. *Geoinformatica*, **13**: 277-289 - doi: 10.1007/s10707-008-0060-5.

MITAS L. & MITASOVA H. (1999) - *Spatial Interpolation*. In "Geographic Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications": 481-492, Wiley, New York.

UFFICIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO DI PISA (1987) - *Annali Idrologici 1987 - Parte II*. Presidenza del Consiglio dei Ministri - Servizi Tecnici Nazionali, Libreria dell'Istituto Poligrafico dello Stato, Roma.

WILCOCK P.R. & CROWE J.C. (2003) - *Surface-based transport model for mixed-size sediment*. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, **129** (2): 120-128.

*Received January 2010 - Accepted April 2010*