

APPLICAZIONE DELLA FOTOGRAMMETRIA TERRESTRE ALLA MISURA DELL'ARRETRAMENTO DI UNA SPONDA FLUVIALE

APPLICATION OF TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRY TO THE MEASUREMENT OF A RIVERBANK RETREAT

LILIANA B. TERUGGI, MASSIMO RINALDI, IVAN CHIAVERINI & DANIELE OSTUNI^(*)

^(*) Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Via Santa Marta, 3 - 50139 Firenze, Italia
E-mail: lteruggi@dicea.unifi.it - mrinaldi@dicea.unifi.it - ivanchi@dicea.unifi.it - dostuni@dicea.unifi.it

RIASSUNTO

Viene riportato uno studio di dettaglio sull'arretramento di una sponda fluviale con l'obiettivo di indagare sui vantaggi e i limiti di una metodologia di alta risoluzione come la fotogrammetria terrestre e di quantificare il materiale eroso da un tratto rappresentativo di sponda in arretramento in un intervallo temporale di circa 30 mesi.

La sponda monitorata è localizzata lungo il corso del fiume Cecina (Toscana centrale, Italia). I depositi della sponda sono stati rilevati e sono state eseguite le analisi granulometriche in corrispondenza dei principali livelli.

Il tratto in oggetto è stato rilevato con la fotogrammetria terrestre applicando sia metodologie analitiche che digitali per verificare l'accuratezza delle misure e comparare vantaggi e svantaggi di ognuna.

I rilevamenti fotogrammetrici di alta risoluzione sono stati integrati con rilevamenti topografici, ripetendoli dopo i principali eventi di piena nel periodo monitorato. Le precipitazioni e le variazioni dei livelli idrometrici misurati durante gli eventi di piena sono stati acquisiti ed analizzati.

Il confronto tra i diversi rilievi ha permesso il calcolo delle differenze volumetriche tra loro e il totale del volume eroso. La distribuzione e l'intensità dell'erosione sono illustrate attraverso l'ottenimento di una mappa di erosione della superficie di sponda.

TERMINI CHIAVE: erosione di sponda, fotogrammetria terrestre analitica e digitale, fiume Cecina

INTRODUZIONE

Le metodologie impiegate per misurare l'arretramento di sponde fluviali sono molto varie e l'utilizzo di una rispetto ad altre può dipendere dalla scala temporale di interesse, dalla difficoltà e dal grado di risoluzione desiderato nelle misure (LAWLER, 1993, LAWLER *et alii*, 1997). In passato le tecniche più utilizzate nella media e breve scala temporale di monitoraggio sono rappresentate dall'utilizzo di picchetti metallici (*erosion pins*) e da rilevamenti topografici tradizionali della sommità e/o del profilo della sponda. Recentemente la fotogrammetria terrestre è diventata una tecnica consolidata per lo studio dei processi erosivi e negli ultimi anni c'è stato un incremento della sua applicazione allo studio dei processi fluviali (LANE, 1998). In letteratura esistono vari esempi dell'uso

ABSTRACT

A detailed study on riverbank retreat is reported with the aim to investigate on advantages and limitations of a high-resolution methodology such as terrestrial photogrammetry, and to quantify the sediment eroded from a representative reach of riverbank during a period of about 30 months.

The study reach is located along the Cecina (Tuscany, Italy). Bank deposits were surveyed and grain size analyses were carried out for the main levels.

In the monitoring reach, analytical and digital photogrammetry have been applied to verify the accuracy of measures and to compare advantages and disadvantages of each one.

High-resolution terrestrial photogrammetry surveys were integrated with topographic measurements, repeated after each major flow events during the monitoring period. Rainfall and changes in river stage measured during flow events have been obtained and analyzed.

Comparison between different surveys enabled precise calculation of the volumetric differences between them and the total volume of material eroded. The distribution and intensity of the erosion are illustrated through an erosion map of the bank surface.

KEY WORDS: river bank erosion, analytical and digital terrestrial photogrammetry, Cecina River

INTRODUCTION

Methodologies employed to measure riverbank retreat are several, and the use of one rather than others depends on the timescale of interest, difficulty in the application, and desired resolution of the measures (LAWLER, 1993, LAWLER *et alii*, 1997). In the past, erosion pins and traditional topographic surveys of the bank line and/or profile have been the most common techniques used for short and median timescales. Recently, terrestrial photogrammetry has become a consolidated technique for monitoring erosion process, and in the last years it has been increasingly applied to fluvial process (LANE, 1998). In literature there are some examples of application of terrestrial photogrammetry to measure river bank retreat (BARKER *et alii*, 1997; PYLE

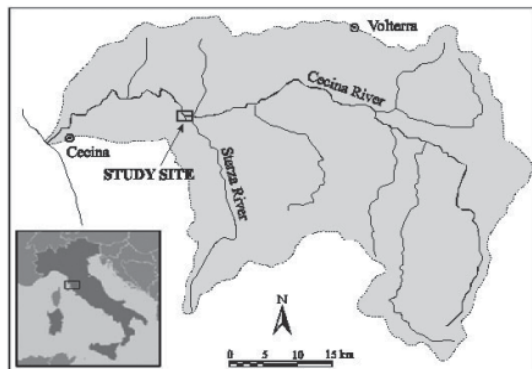


Fig. 1 - Ubicazione dell'area di studio
- Study area location

della fotogrammetria terrestre per misurare l'arretramento di sponde fluviali (BARKER *et alii*, 1997; PYLE *et alii*, 1997; DIXON *et alii*, 1998), più recentemente anche in Italia (RINALDI *et alii*, 2002; TERUGGI *et alii*, 2005).

Gli obiettivi di questa ricerca sono i seguenti: (1) fornire una dettagliata caratterizzazione dei sedimenti di un tratto rappresentativo di sponda in arretramento e delle piene registrate durante il periodo di monitoraggio, funzionale ad una successiva interpretazione dei risultati delle analisi fotogrammetriche; (2) indagare sui vantaggi e i limiti della fotogrammetria terrestre e quantificare il materiale eroso della sponda. A tal fine, sono state considerate le tecniche fotogrammetriche che utilizzano camere metriche di tipo analogico e quelle procedure di acquisizione delle immagini con camere digitali calibrate.

AREA DI STUDIO

L'area di studio è localizzata nel bacino del fiume Cecina (Toscana centrale). Il Cecina è un fiume ghiaioso con barre alternate, è lungo 79 km e l'area di drenaggio è di circa 905 km².

Una stazione idrometrica è localizzata presso il Ponte di Monterufoli, 2 km a monte della confluenza con il Torrente Sterza (Fig.1) e copre un'area di drenaggio di 634 km². La media delle portate giornaliere è 7,5 m³ s⁻¹ e la portata con tempo di ritorno di due anni (Q₂) è 339,9 m³ s⁻¹. La media annuale delle precipitazioni è circa 950 mm.

Il tratto in studio è localizzato subito a monte della confluenza del fiume Cecina con uno dei suoi affluenti di sinistra, il Torrente Sterza (Fig. 1). La pendenza media del tratto è di circa 0,0021.

CARATTERIZZAZIONE DEI DEPOSITI DI SPONDA

La sponda monitorata ha un'altezza media di circa 5,5 m ed una lunghezza di circa 70 m soggetti ad erosione attiva. La sponda è stratificata, essendo composta da livelli con diverse caratteristiche composizionali e tessiturali. I depositi di sponda sono stati rilevati in 6 sezioni sedimentologiche e sono stati identificati 6 livelli principali, dal basso verso l'alto: *Ghiaia*: ghiaia abbastanza cementata, massiva e scarsamente selezionata (D₅₀ = 12,6 mm) con matrice sabbiosa. Lo spessore affiorante varia tra 40 e 70 cm; questa ghiaia è sempre presente nella sequenza rilevata. In nessuna delle sezioni è stato possibile osserva-

et alii, 1997; DIXON *et alii*, 1998), including in Italy (RINALDI *et alii*, 2002; TERUGGI *et alii*, 2005).

The aims of this research are the following: (1) to provide a detailed characterization of the sediments and the flow events recorded during the monitoring period of a representative reach of retreating riverbank, aimed to a subsequent interpretation of the results of photogrammetric analyses; and (2) to investigate on advantages and limitations of terrestrial photogrammetry and to quantify the sediment delivered by bank erosion processes. For this scope, photogrammetrical techniques making use of analogical photogrammetric cameras, and digital calibrated cameras for images acquisition have been considered.

STUDY AREA

The study area is located in the Cecina river catchment (Tuscany). The Cecina is a gravel bed river with large alternating lateral bars is 79 km long and has a catchment area of about 905 km².

A flow gauge is located at Ponte di Monterufoli, 2 km upstream of the confluence with the Sterza Torrent (Fig.1), having a drainage area of 634 km². The average of the mean-daily discharges is 7.5 m³ s⁻¹ and the peak discharge of the two year return period (Q₂) is 339.9 m³ s⁻¹. The average annual precipitation is around 950 mm.

The study reach is located immediately upstream of the confluence between the Cecina River and one of its tributaries, the Sterza (Fig. 1). The mean channel gradient of the reach is about 0.0021.

CHARACTERIZATION OF BANK DEPOSITS

The monitored bank has an average height of about 5.5 m and a length of 70 m subject to active erosion. It is stratified, consisting of levels with different compositional and textural characteristics. The bank deposits were surveyed in six sedimentological logs, revealing 6 principal levels, from the bottom to the top:

Gravel: fairly cemented, massive and poorly sorted gravel (D₅₀ = 12.6 mm) with a sandy matrix. Visible thickness ranges from 40 to 70 cm; this gravel is always present at the base of the measured sequence. The bottom can not be seen at any point

Tab. 1 - Parametri granulometrici
- Grain size parameters

	LEVEL					
	1	2	3	4	5	6
Gravel (%)	74.9	44.5	0	0	0	0
Sand (%)	25.1	55.5	100	10.1	18.6	26
Silt (%)	0	0	0	63.9	70.3	65.8
Clay (%)	0	0	0	26	11	8.2
D16 (mm)	11	0.4	0.11	-	0.01	0.02
D50 (mm)	12.6	1.4	0.19	0.01	0.05	0.05
D84 (mm)	41.8	17.9	0.27	0.02	0.07	0.08

re la base. Non si osservano strutture interne. Possono presentare localmente embriciamento non molto evidente.

Ghiaia e sabbia: ghiaia fine, scarsamente cementata con abbondante matrice sabbiosa ($D_{50} = 1.4$ mm). Il livello è associato a livelli di ghiaia sabbiosa con lamine inclinate con valori intorno ai 20° ed a livelli orizzontali di sabbia con spessori dell'ordine da pochi a 35 cm.

Sabbia: strato di sabbia massiva ben selezionata ($D_{50} = 0.19$ mm) con spessore di 4 a 10 cm.

Limo sabbioso debolmente argilloso: livelli di limi sabbiosi che si alternano con lamine di sabbia fine e molto fine ($D_{50} = 0.01$ mm) che gradualmente passano a livelli di limi argillosi grigiastri.

Limo sabbioso massivo: sabbia fine e limi grigi ($D_{50} = 0.05$ mm) che gradualmente assumono un colore rosastro e hanno uno spessore di circa 170-200 cm.

Limo sabbioso: limi sabbiosi ($D_{50} = 0.05$ mm), con spessori di 60-70 cm, pedogenizzati, compatti e con resti di radici.

Nei sei livelli sono stati eseguiti le analisi granulometriche (Tab. 1) e due prove penetrometriche statiche (CPT). I sedimenti fini sono stati soggetti ad analisi geotecniche, sia di laboratori che *in situ* (RINALDI *et alii*, 2008; LUPPI *et alii*, 2009). Le prove di laboratorio nei sedimenti corrispondenti ai livelli superiori (limo sabbioso massivo e limo sabbioso) includono analisi di rapporto tra le fasi e prove triassiali (CU). Le prove eseguite *in situ* sui sedimenti del livello limo sabbioso consistono in: (1) prove infiltrometriche per determinare la conducibilità idraulica satura, k_s (Amoozegar test: AMOOZEGAR, 1989); (2) prove di taglio in foro (BST: *borehole shear tests*, LUTENEGGER & HALLBERG, 1981) per determinare i parametri di resistenza al taglio; (3) misura della suzione attraverso un tensiometro. Per maggiori dettagli vedere RINALDI *et alii*, 2008; LUPPI *et alii*, 2009.

MONITORAGGIO DELL'ARRETRAMENTO DI SPONDA

L'attività di monitoraggio sviluppata in questo tratto include rilevamenti topografici tradizionali e misure dell'erosione di sponde adoperando fotogrammetria terrestre ad alta risoluzione (LAWLER, 1993). Durante il primo anno è stato effettuato, inoltre, un monitoraggio idrologico (livello idrometrico e piezometrico) al fine di definire le caratteristiche idrologiche di ogni evento di piena. Gli anni successivi, i livelli idrometrici del tratto monitorato sono stati stimati in base ad una regressione calcolata tra i dati misurati alla Stazione di Monterufoli ed i dati locali misurati durante il primo anno di monitoraggio.

and internal structures are not visible. Imbrication can be observed locally but it is not very evident.

Gravel and sand: poorly cemented fine gravel with an abundant sandy matrix ($D_{50} = 1.4$ mm). The level is associated with sandy-gravel ones, with sheets that dip at an angle of around 20° and horizontal sand levels that have thicknesses of some cm to 35 cm.

Sand: massive, well sorted sand layers ($D_{50} = 0.19$ mm) 4-10 cm thick.
Clayey-sandy silt: sandy silt levels alternating with horizontal sheets of fine and very fine sandy sediments ($D_{50} = 0.01$ mm) that gradually give way to grey clayey silt.

Massive sandy silt: finer sand and grey silt ($D_{50} = 0.05$ mm) that gradually assumes a reddish colour and has a thickness of about 170-200 cm.

Sandy silt: sandy silt material ($D_{50} = 0.05$ mm), 60-70 cm thick, pedogenized, compact and with a lot of root traces.

Grain size analyses (Tab. 1) and two static penetration tests (CPT) were carried out on the six levels. Geotechnical analyses have been carried out on the fine sediments, both in the laboratory and *in situ* (RINALDI *et alii*, 2008; LUPPI *et alii*, 2009). The laboratory tests on sediments from the upper levels (massive sandy silt and sandy silt) included phase relationship analysis and triaxial consolidated-undrained tests (CU). The *in situ* tests on sediments from level 6 included: (1) seepage tests to determine the saturated hydraulic conductivity, k_s (Amoozegar test: AMOOZEGAR, 1989); (2) *borehole shear tests* (BST, LUTENEGGER & HALLBERG, 1981) to determine the shear strength parameters; and (3) matric suction measurements using a tensiometer. For more details see RINALDI *et alii*, 2008; LUPPI *et alii*, 2009.

MONITORING OF BANK RETREAT

The monitoring activity carried out along the river reach included traditional topographic surveys and bank erosion measurements adopting high-resolution terrestrial photogrammetry (LAWLER, 1993). During the first year were also monitored the river stage and water table in order to define the hydrological characteristics of each flow event. For the successive years, the hydrometric levels were estimated using a regression calculated between the data measured at Monterufoli Station and the local data measured during the first monitoring year.

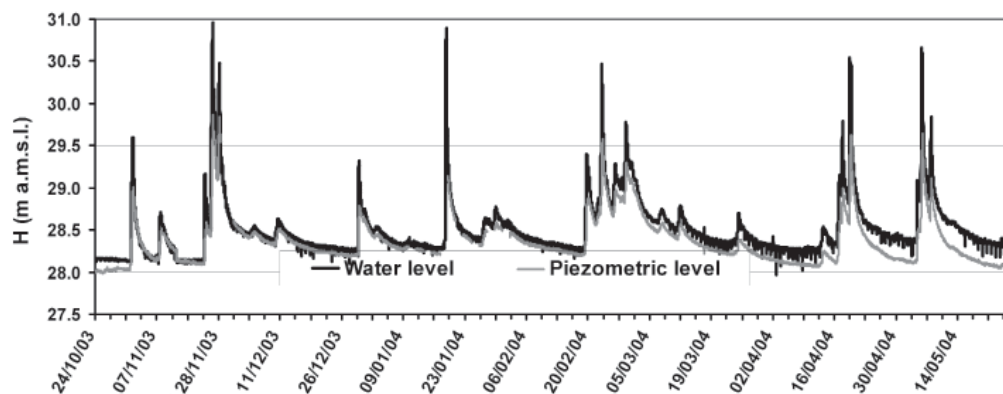


Fig. 2 - Eventi di piena registrati durante il periodo monitorato
- Flow events recorded during the monitored period

MONITORAGGIO IDROLOGICO

Sono stati misurati il livello del fiume e, per un primo periodo, il livello della falda nella sponda. Durante il primo periodo di monitoraggio è stata realizzata una stazione di misura costituita da due piezometri ed un idrometro installati presso l'estremità a monte del tratto di sponda oggetto delle misure di arretramento. I sensori erano connessi ad un *data logger* che ogni 15 minuti effettuava una registrazione. In Fig. 2 sono riportati gli eventi di piena registrati durante il periodo di monitoraggio. Sono stati identificati 7 eventi di piena. Il picco massimo è stato registrato durante il secondo evento, il 26 novembre 2003, quando il livello dell'acqua ha raggiunto 30,96 m s.l.m, questo livello corrisponde a una $Q_{1,5} = 256 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (LUPPI *et alii*, 2009).

FOTOGRAMMETRIA TERRESTRE

La posizione planimetrica iniziale dell'orlo di sponda e la topografia del letto del tratto studiato sono state rilevate con una stazione totale Geotronics 440.

I rilevamenti ad alta risoluzione effettuati con la fotogrammetria terrestre sono stati integrati con rilevamenti topografici di dettaglio, i quali sono stati necessari per acquisire i punti di appoggio sulla superficie della sponda. Le coordinate di questi punti sono stati rilevati con un'alta accuratezza perché la precisione del risultato finale dipende dall'esattezza di queste misure (WOLF, 1983). Nella parte alta della sponda sono stati localizzati 12 punti ed altri 10 sulla sua superficie. Ogni punto è stato segnato con una placca di legno numerata, con una croce nera (di facile osservazione nei fotogrammi) e un prisma centrato per determinare le coordinate piano altimetriche.

Le stazioni fotogrammetriche sono state posizionate lungo una linea parallela di fronte alla superficie della sponda e sono state distribuite in modo da ottenere una sovrapposizione del 60 per cento tra le fotografie.

Durante il periodo di monitoraggio, tra giugno 2003 e gennaio 2006, i rilevamenti fotogrammetrici terrestri sono stati ripetuti in genere due volte l'anno, dopo i principali eventi di piena (Tab. 2).

I primi due rilevamenti fotogrammetrici sono stati ripresi solo con

HYDROLOGICAL MONITORING

The river stage and water table within the bank were measured during the entire monitoring period. A gauging station consisting of two piezometers and a water level sensor was installed at the upstream end of the bank monitoring reach. The sensors were connected to a *data logger* that made recordings every 15 minutes. Fig. 2 shows flow events recorded during the monitored period. Seven flow events were identified. The maximum peak stage was recorded during the 2nd event, on 26 November 2003, when the water level reached 30.96 m a.s.l. which corresponds to an estimated $Q_{1,5} = 256 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (LUPPI *et alii*, 2009).

TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRY

A high-resolution total station Geotronics 440 was used to survey the planimetric position of the bank edge and to characterize the bed topography of the study reach.

The high-resolution terrestrial photogrammetry measurements were integrated with a detailed topographic survey, which was necessary in order to establish a series of control points on the bank surface. The coordinates of these points were surveyed with a high degree of accuracy, because the precision of the final result depends on the exactness of these measures (WOLF, 1983). Twelve evenly distributed points were located at the top of the bank and 10 on the bank face. Each point was marked by a numbered wooden plate with a black cross (easy to detect on the photographs) and a centred prism for determining the plano altimetric coordinates.

The photogrammetric stations were placed parallel to the bank face, along a baseline on the opposite side of the river, and were distributed to obtain a 60 per cent overlap between photographs.

During the monitoring period, between June 2003 and January 2006, the terrestrial photogrammetric surveys were repeated generally twice a year, after the main flow events (Tab. 2).

The first two photogrammetric surveys were carried out only with

Tab. 2 - Dati sui rilevamenti fotogrammetrici terrestri
- Data about the terrestrial photogrammetric surveys

Survey	Date	Area (m ²)	Volume (m ³)	Volumetric Changes (m ³)
1	04/06/03	226.7	22376	
2	12/12/03	226.7	22585	-210
3	19/07/04	226.7	22844	-259
4	02/02/05	226.7	23029	-185
5	11/01/06	226.7	23744	-715
TOTAL				-1,369

Fig. 3 - Sezioni verticali ottenute dalla restituzione analitica. In rosso il primo rilevamento; in blu il secondo e in verde il terzo
- Vertical sections obtained by analytical restitution. In red the first survey, in blue the second one and in green the third one

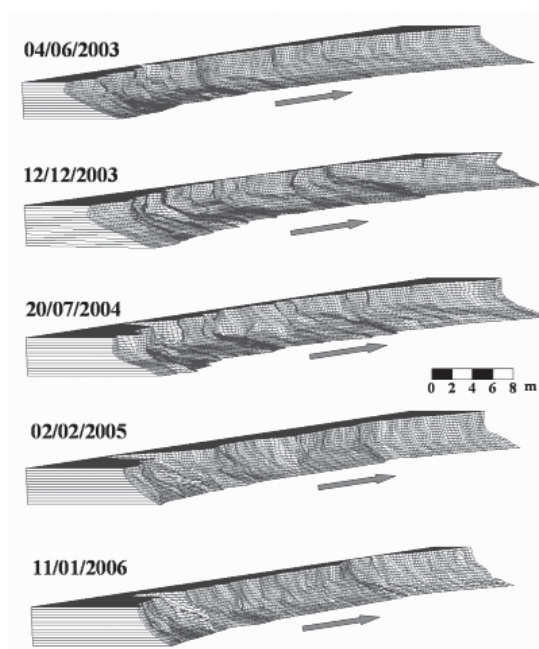
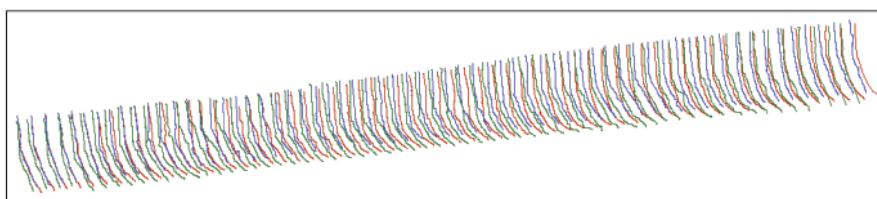


Fig. 4 - Modello digitale del terreno della sponda monitorata
- Digital terrain model of the monitored bank

una camera analogica (Galileo Verostat) caricata con pellicola ISO 100. In ogni rilevamento sono stati acquisiti nove fotogrammi stereoscopici.

L'elaborazione delle immagini analogiche è stata effettuata tramite stereocartografo analitico Digicart 40. I fotogrammi relativi ai vari rilevamenti sono stati georiferiti usando i punti di controllo determinati dai rilevamenti topografici.

I dati tridimensionali di restituzione sono stati elaborati sotto forma di 62 sezioni verticali definite con una risoluzione dell'ordine del centimetro (Fig. 3), identificate con una codifica temporale specifica per un confronto diretto delle stesse nei diversi rilevamenti fotogrammetrici. Questi dati sono trasferiti direttamente ad un Sistema di Informazione Geografica (GIS) e un modello digitale tridimensionale del terreno è generato per ogni rilevamento fotogrammetrico (Fig. 4).

an analogical (Galileo Verostat) camera loaded with ISO 100 film. Nine stereoscopic photograms were obtained for each survey.

The stereoscopic images were processed with a Digicart 40 analytical plotter. The photograms relative to the various surveys were georeferenced using the control ground point determined by the topographic surveys.

The restitutions of the three-dimensional data were processed in digital form as 62 vertical sections (Fig. 3); each one had a resolution of one centimetre and was identified with a temporal code for direct comparison with subsequent photogrammetric surveys. These data were directly transferred into a Geographical Information System (GIS) and a three-dimensional digital terrain model (DTM) was generated for each photogrammetric survey (Fig. 4).

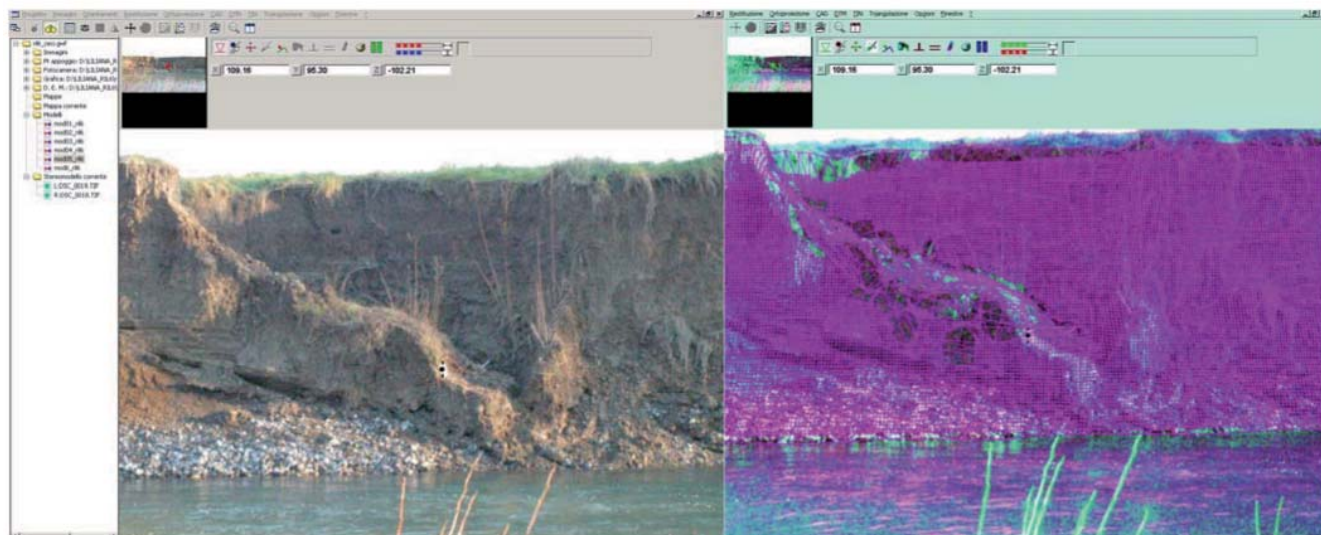


Fig. 5 - Restituzione digitale con il software Micromap
- Digital restitution with Micromap software

L'attuale livello tecnologico nella produzione dei sensori digitali (CCD) ad alta risoluzione, con dimensioni superiori a 12 mega pixel, ha consentito di eseguire una serie di rilevamenti fotogrammetrici terrestri usando camere digitali calibrate per fotogrammetria (con definizione degli orientamenti interni) Nikon D100. Questi rilevamenti sono stati realizzati in parallelo ai tradizionali rilevamenti fotogrammetrici di tipo analogico.

La restituzione dei fotogrammi digitali è stata realizzata con un software digitale (Micromap) ed il prodotto finale è un DTM con definizione di 5 centimetri (Fig. 5).

I rilevamenti fotogrammetrici terrestri digitali hanno il vantaggio di essere più veloci dei rilevamenti analogici e anche la restituzione digitale è più veloce dell'analitica. Lo svantaggio è che essi presentano una risoluzione inferiore (LENZ, 1989).

SEDIMENTI EROSI

Il confronto tra i rilevamenti fotogrammetrici della stessa area acquisiti in momenti diversi ha reso possibile il calcolo accurato delle differenze volumetriche tra di loro ed il calcolo del volume del materiale eroso a seguito di ogni evento di piena. Nel periodo tra il primo rilevamento (04/06/2003) ed il quinto rilevamento (11/01/2006), la quantità di materiale eroso dalla sponda è stato stimato intorno a 1.369 m³. Il totale del volume di sedimento eroso dalla sponda monitorata è di circa 22,08 m³/m.

Una mappa di erosione della superficie di sponda è stata realizzata con il fine di identificare la distribuzione e l'intensità dell'erosione lungo il tratto monitorato. I valori negativi rappresentano il materiale eroso ed i valori positivi indicano il materiale depositato. Il massimo valore di erosione (negativo) è stato di 10 m (Fig. 6 d) e non c'è stata sedimentazione nel periodo analizzato.

The present technological level in the production of high-resolution digital sensors (CCD) with dimensions up to 12 megapixel has allowed to carry out a series of terrestrial photogrammetric survey using digital calibrated camera (with internal orientation defined) Nikon D100. These surveys were realized in parallel with analogical ones.

The restitution of the digital photograms was carried out by using a digital software (Micromap) and the final product is a DTM with resolution of 5 centimetres (Fig. 5).

The digital terrestrial photogrammetric survey has the advantage of being quicker than the analogical one, as well as digital restitution is easier and quicker than the analytical one. The disadvantage is that digital techniques have less resolution (LENZ, 1989).

ERODED SEDIMENTS

Comparison of surveys of the same area carried out in different periods of time has made possible to accurately calculate the volumetric differences between them and the volume of eroded material during each flow event. In the period between the first survey (04/06/2003) and the fifth survey (11/01/2006), the calculated amount of material eroded from the bank was around 1,369 m³. The total volume of sediment delivered by the monitored bank was therefore 22.08 m³/m.

An erosion map of the bank surface was constructed in order to identify the distribution and intensity of the erosion along the monitoring reach. The negative values represent the material eroded and the positive ones indicate the material deposited (Fig. 6). The maximum erosion (negative value) was 10 m (Fig. 6 d) and there was not any sedimentation in the period analysed.

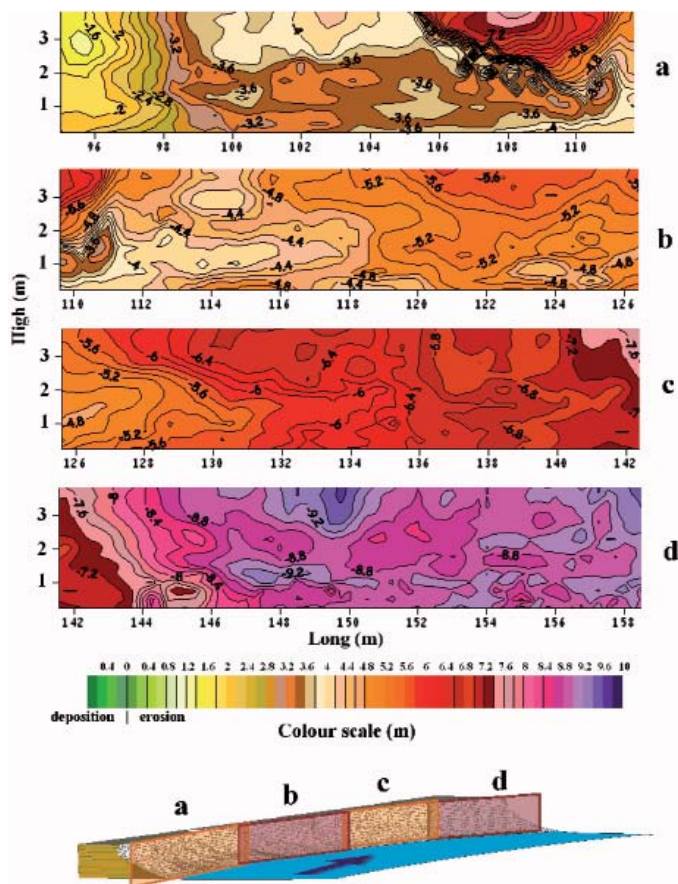


Fig. 6 - Mappa di erosione della sponda
- Bank erosion map

LEVEL	AREA		ERODED VOLUME	
	(m ²)	(%)	(m ³)	(%)
Sandy silt	62.89	23.92	61.59	29.37
Massive sandy silt	79.37	30.18	72.94	34.78
Clayey-sandy silt	21.82	8.30	5.62	2.68
Sand	21.31	8.10	16.47	7.85
Gravel and sand	45.27	17.21	36.12	17.22
Gravel	32.30	12.28	16.98	8.10
TOTAL	262.95	100.00	209.72	100.00

Tab. 3 - Volume del materiale eroso di ogni livello durante un singolo evento di piena
- Volume of material eroded for each level during a single flow event

Il confronto tra i rilevamenti fotogrammetrici ha anche permesso di ricavare notificazioni accurate e dettagliate sul comportamento di ogni livello litologico lungo l'intera superficie di sponda erosa, prima e dopo un evento di piena. Il volume del materiale eroso durante un singolo evento di piena è stato calcolato per ognuna delle litologie presente (Tab. 3).

I depositi della parte superiore della sponda costituiti da sedimenti coesivi (limo sabbioso, limo sabbioso massivo, limo sabbioso debolmente argilloso) rappresentano il 71% del totale dell'area esposta della sponda, mentre il 29% rimanente consiste in sedimenti non coesivi (ghiaia e sabbia) (Tab. 3).

CONSIDERAZIONI FINALI

In questa ricerca sono stati integrati rilevamenti fotogrammetrici terrestri analogici e digitali con lo scopo di misurare l'arretramento di una sponda fluviale.

Durante il periodo 2003-2004, il monitoraggio della sponda è stata combinata con il monitoraggio idrologico del livello del fiume e della falda. Sono stati registrati 7 eventi di piena significativi.

I rilevamenti fotogrammetrici terrestri eseguiti con camere digita-

The comparison of the photogrammetric surveys also provided accurate and detailed information about the behaviour of each level along the entire eroding bank surface before and after a flow event. The volume of material eroded for each level during a single flow event was also calculated (Tab. 3).

The upper bank layers made up of cohesive sediments (sandy silt, massive sandy silt, clayey-sandy silt and sand) represent 71% of the total exposed bank area, while the remaining 29% consists of non cohesive sediments (gravel and sand) (Tab. 3).

FINAL CONSIDERATIONS

In this research analogical and digital terrestrial photogrammetric surveys were integrated in order to measure riverbank retreat.

During 2003-2004 riverbank monitoring was combined with hydrological monitoring of river stage and water table. Seven significant flow events were recorded.

The terrestrial photogrammetric surveys carried out by digital camera have the advantage of being quicker than those carried out

li hanno il vantaggio di essere più veloci dei rilevamenti eseguite con camere analogiche, anche le procedure di restituzione con software digitali risultano più semplice e più veloci delle corrispondenti eseguite con restitutori analitici. Rimane comunque la limitazione relativa ad una minore risoluzione dell'immagine digitale rispetto a quella acquisita con camere analogiche (pellicola fotografica).

I rilevamenti fotogrammetrici terrestri consentono un'analisi accurata di una stessa superficie di sponda fluviale prima e dopo dei processi di erosione. Di conseguenza è stato possibile produrre dei 3D-DTM di dettaglio e calcolare le differenze volumetriche tra i rilevamenti. Inoltre, è stato possibile quantificare il volume dei sedimenti erosi da ogni livello durante un evento di piena. I sedimenti coesivi costituiscono più del 65% del totale del materiale eroso. E' stata costruita una mappa di erosione della superficie della sponda con il fine di identificare la distribuzione e intensità dell'erosione lungo il tratto di sponda.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato finanziato dal *Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca* (MIUR) (incentivi a favore della mobilità di studiosi italiani e stranieri impegnati all'estero, D.M. 26 Gennaio 2001 n.13). Gli autori ringraziano F. Vannacci per la sua assistenza nel laboratorio e durante il lavoro di campo.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AMOOZEGAR A. (1989) - *A compact constant-head permeameter for measuring saturated conductivity of the vadose zone*. Soil Science Society of American Journal, **53**: 1356-1361.
- BARKER R., DIXON L. & HOOKE J. (1997) - *Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion*. Earth Surface Processes and Landforms, **22**: 1217-1227.
- DIXON L.F.J., BARKER R., BRAY M., FARRIS P., HOOKE J., INKPEN R., MEREL A., PAYNE D. & SHELFORD A. (1998) - *Analytical photogrammetry for geomorphological research*. In: LANE S.N., RICHARDS K.S. & CHANDLER J.H. (1998, eds.) - *Landform monitoring, modelling and analysis*. 63-94, Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- LANE S.N. (1998) - *The use of digital terrain modelling in the understanding of dynamic river systems*. In: LANE S.N., RICHARDS K.S. & CHANDLER J.H. (1998, eds.) - *Landform monitoring, modelling and analysis*. 311-342, Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- LAWER D.M. (1993) - *The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review*. Earth Surface Processes and Landforms, **18**: 777-821.
- LAWER D.M., THORNE C.R. & HOOKE J.M. (1997) - *Bank erosion and instability*. In: THORNE C.R., HEY R.D. & NEWSON M.D. (1997, eds.) - *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*. 137-172, Willey.
- LENZ R.K. (1989) - *Image data Acquisition with CCD Cameras*. OMT.
- LUPPI L., RINALDI M., TERUGGI L.B., DARBY S.E. & NARDI L. (2009) - *Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (Central Italy)*. Earth Surface Processes and Landforms, **34**: 530-546.
- LUTENEGGER A. J. & HALLBERG G.R. (1981) - *Borehole Shear Test in geotechnical investigation*. Special Technical Publ. American Society for Testing and Materials, **740**: 566-578.
- PYLE C.J., CHANDLER J.H. & RICHARDS K.S (1997) - *Digital photogrammetric monitoring of riverbank erosion*. Photogrammetric Record, **15**: 753-764.
- RINALDI M, LUPPI L., MENGONI B., DARBY S.E. & MOSSELMAN E. (2008) - *Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bend*. Water Resources Research **44**. DOI: 10.1029/2008WR007008.
- RINALDI M., DE ROSA G., CATANI F., DAPPORTO S., VANNOCCI P., MORETTI S. & CASAGLI N. (2002) - *Misura dell'arretramento di una sponda fluviale attraverso fotogrammetria terrestre digitale con analisi dei processi di erosione*. Boll.Soc.Geol.It., **121**: 275-287.
- TERUGGI L.B., CHIAVERINI I, OSTUNI D. & RINALDI M. (2005) - *Integrated methodology for monitoring fluvial bank erosion*. Geologica Romana, **38**: 25-29.
- WOLF P.R. (1983) - *Elements of photogrammetry*. 2nd edition, Mc Graw-Hill, Signapore.

by analogical camera. The restitution processes with digital software are also easier and quicker than the corresponding procedures using analytical plotters. However, the limitation of the digital image is that it has a lower resolution than one taken with an analogical camera (film).

Terrestrial photogrammetric surveys enable an accurate analysis of changes of the same riverbank surface before and after erosion processes. It was thus possible to produce detailed 3D-DTMs and to calculate the volumetric differences between the surveys. Furthermore, the volume of sediment supplied to the river by each level during a single flow event was quantified. The cohesive sediments are more than 65% of the total eroded material. An erosion map of the bank surface was constructed to identify the distribution and intensity of the erosion along the bank reach.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by the Italian *Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca* (MIUR) (incentivi a favore della mobilità di studiosi italiani e stranieri impegnati all'estero, D.M. 26 Gennaio 2001 n.13). The authors would like to thank F. Vannacci for his assistance in the laboratory and during the field work.

Received January 2010 - Accepted July 2010