

DINAMICA RECENTE ED ATTUALE DI ALVEI FLUVIALI: ALCUNI CASI DI STUDIO APPENNINICI (ITALIA CENTRO-SETTENTRIONALE)

Massimo Rinaldi, Liliana B. Teruggi, Cristina Simoncini & Laura Nardi
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze
e-mail: mrinaldi@dicea.unifi.it

RIASSUNTO: M. Rinaldi et al., *Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali: alcuni casi di studio appenninici (Italia centro-settentrionale)* (IT ISSN 0394-3356, 2008).

Vengono analizzate e discusse le variazioni morfologiche recenti (ultimi 100 anni circa) e le tendenze attuali di tre casi di studio rappresentativi dell'Appennino centro - settentrionale: (1) Fiume Magra e suo principale affluente, Fiume Vara, relativi all'area appenninica compresa tra Toscana Settentrionale e Liguria; (2) Fiume Panaro, rappresentativo del versante padano dell'Appennino Tosco-Emiliano; (3) Fiume Cecina, rappresentativo della Toscana meridionale. Tale studio è finalizzato principalmente ai seguenti obiettivi: (1) estendere le attuali conoscenze sull'evoluzione recente di alvei fluviali italiani a nuovi casi di studio dell'Appennino centro-settentrionale; (2) confrontare tali casi tra loro per definirne gli aspetti evolutivi comuni e le differenze eventualmente da attribuirsi a particolari contesti geomorfologici e/o ad impatti antropici specifici.

Sono stati presi in esame i seguenti aspetti: (1) ricostruzione degli interventi antropici diretti ed indiretti per valutare il loro possibile ruolo nei confronti delle variazioni morfologiche degli alvei; (2) analisi delle variazioni morfologiche degli alvei: sono state acquisite ed analizzate tramite GIS le cartografie e le foto aeree disponibili, in modo da permettere un confronto degli alvei in diversi anni e consentire la misura dei parametri planimetrici (larghezza dell'alveo, sinuosità, indice di intrecciamento), ed i rilievi topografici esistenti per ricostruire le variazioni di quota del fondo; (3) rilevamento geomorfologico di campo, attraverso l'applicazione di apposite schede focalizzate sull'interpretazione e la classificazione delle variazioni e delle tendenze attuali.

I risultati possono essere sintetizzati come segue: (1) tutti i casi di studio sono stati interessati da abbassamento del fondo, con i casi di incisione più intensa (fino a valori di 7-10 m) registrati per il F. Panaro e per il F. Magra nel suo tratto inferiore; (2) analogamente, tutti i corsi d'acqua analizzati hanno subito un restringimento dell'alveo attivo; (3) si possono generalmente distinguere due fasi di aggiornamento morfologico (restringimento - incisione), con la fase più intensa compresa tra gli anni '50 e i primi anni '90; (4) tali variazioni morfologiche sono fortemente correlate a fattori antropici, con rapporti causa - effetto chiari e con modifiche di maggiore entità avvenute nei fiumi soggetti a maggiore impatto; (5) durante gli ultimi 10-15 anni circa, si osserva in alcuni casi una inversione di tendenza della larghezza (fase di allargamento, ad eccezione del F. Cecina che continua nella sua fase di restringimento), accompagnata talora da situazioni di sedimentazione; (6) gli ultimi dati (2006/07) indicano in alcuni di questi casi una nuova lieve riduzione di larghezza.

ABSTRACT: M. Rinaldi et al., *Recent and present dynamics of river channels: some study cases from the Apennines (central-northern Italy)*. (IT ISSN 0394-3356, 2008).

During the last decades and centuries, many fluvial systems of the world have been heavily impacted by various types of human disturbances. Regarding the Italian rivers, a bibliographic review carried out by Surian & Rinaldi (2003) pointed out two main types of channel adjustments (incision and narrowing) and proposed a classification scheme of the types and amount of channel adjustments. From more recent studies (Surian & Rinaldi, 2004) it is emerging that an inversion of trend in width adjustments (widening) and/or in bed-level adjustments (aggradation) have recently occurred in some study cases. Notwithstanding recent progress, there still remains the need to describe these processes more accurately and for a larger number of study cases. The research project PRIN 2005 "Present and recent dynamics of river channels in Northern and Central Italy: evolutionary trends, causes and management implications" has this general aim. This paper deals with changes and evolutionary trends of river channels in the Northern Apennines. The two main objectives of this research are: (1) to extend the knowledge of channel adjustments to new study cases in the northern Apennine; (2) to compare such study cases to define common trends of adjustments and differences eventually related to different geomorphic contexts and human impacts.

The following study cases have been selected, in order to represent different situations in the geographical context of central-northern Apennines: (1) Magra River and its main tributary, Vara River; (2) Panaro River; (3) Cecina River, as a representative case of watershed located in Southern Tuscany.

The following main aspects were investigated in detail:

- 1. Reconstruction of human interventions and disturbances in order to verify their possible role on the channel adjustments.*
- 2. Analysis of channel changes. Most of the available maps and aerial photos were acquired and analysed in GIS, with the aim to allow for comparisons and measurements of the planimetric parameters (channel width, sinuosity, braiding index). Then, a reconstruction of bed-level changes through the comparison of topographic surveys from different years was carried out.*
- 3. Field surveys. A series of forms for geomorphological field surveys were developed and applied to the study cases with a particular focus on the interpretation and classification of channel adjustments.*

The main results can be summarised as follows: (1) all study cases have been affected by channel bed incision, with the highest bed-level lowering (up to 7-10 m) recorded along the Panaro River and the lower part of the Magra River; (2) similarly, all study cases have been affected by channel narrowing; (3) two phases of channel adjustment (incision - narrowing) can be distinguished, with the phase of major changes occurring between about '50s and the beginning of '90s; (4) such changes appear strongly connected to human factors, with quite evident cause-effect relations, and with the highest changes occurring along the rivers with strong human impact; (5) during the last 10-15 years, an inversion of trend of channel width is observed (widening phase, except for the Cecina River where the phase of channel narrowing is still continuing), coupled in some cases with situations of aggradation; however, during the last years (2006/07) a slightly new reduction in channel width is observed in some cases.

Parole chiave: Variazioni morfologiche di alvei fluviali, fiumi italiani, impatti antropici

Keywords: Channel adjustments, Italian rivers, human impacts

1. INTRODUZIONE

Durante gli ultimi secoli, la maggior parte dei fiumi italiani è stata fortemente impattata da vari tipi di disturbi antropici e molti di questi corsi d'acqua stanno tuttora modificando, come risposta a tali impatti, la propria forma e le proprie dimensioni. Tale dinamicità morfologica può determinare problemi in termini di rischi da dinamica d'alveo (danni a centri abitati, infrastrutture, perdita di terreni, possibili esondazioni connesse a processi di sedimentazione) ma, in molti casi, può avere effetti benefici per gli ecosistemi, promuovendo spontaneamente la diversificazione di habitat. Pertanto la conoscenza delle tendenze evolutive dei corsi d'acqua è fondamentale sia ai fini della protezione e della sicurezza che in termini di gestione e riqualificazione fluviale.

Per quanto riguarda i fiumi italiani, esiste già una certa conoscenza delle variazioni morfologiche avvenute nel corso degli ultimi 100 - 150 anni. Gli studi al riguardo partono da fine anni '70 - inizi anni '80 (ad es. CASTIGLIONI & PELLEGRINI, 1981) e sono sempre più numerosi negli anni successivi (si veda ad es. BRAGA & GERVASONI, 1989; CASTALDINI & PIACENTE, 1995; SURIAN, 1999; MARCHETTI, 2002). SURIAN & RINALDI (2003) hanno effettuato una rassegna di tutte le conoscenze acquisite sull'argomento, delineando i principali tipi di variazioni osservate in fiumi italiani e definendo uno schema generale di evoluzione. In alcuni casi (ad es. RINALDI & SIMON, 1998; RINALDI, 2003) è stata ben evidenziata l'esistenza di due principali fasi di aggiustamento morfologico: (a) da fine 1800 a metà del 1900, con incisioni e restringimenti meno intensi e legati soprattutto a fattori a scala di bacino; (b) seconda metà del 1900, con modifiche più forti legate soprattutto ad interventi ed attività in alveo. Meno approfondite risultano essere invece le conoscenze relative alle attuali tendenze evolutive dei corsi d'acqua italiani. Da alcuni autori (SURIAN & RINALDI, 2004; RINALDI *et al.*, 2005a), limitatamente a qualche caso di studio, è stata osservata preliminarmente una inversione di tendenza delle larghezze e, in alcuni casi, delle quote del fondo.

A seguito di questi studi, è maturata quindi la necessità di un approfondimento, descrivendo più accuratamente le variazioni passate ed attuali e per un numero più ampio di casi di studio, esigenze dalle quali è scaturito il progetto PRIN 2005 "Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali in Italia centro-settentrionale: tendenze evolutive, cause ed implicazioni applicative". In questo articolo si riportano sinteticamente i principali risultati relativi a tre casi di studio inclusi in questo progetto (relativamente all'U.O. di

Firenze), con i seguenti obiettivi: (1) estendere le attuali conoscenze sull'evoluzione recente di alvei fluviali italiani a nuovi casi di studio dell'Appennino centro-settentrionale; (2) confrontare tali casi tra loro per definirne gli aspetti evolutivi comuni e le differenze eventualmente legate a contesti geomorfologici differenti e sia agli impatti antropici specifici.

2. CASI DI STUDIO

2.1 Inquadramento generale dei bacini

I tre bacini di studio sono ubicati nell'Italia centro-settentrionale (Fig. 1) e sono stati scelti in modo da essere sufficientemente rappresentativi di aree con condizioni morfologico - climatiche relativamente diverse all'interno dell'Appennino settentrionale. In Tabella 1 sono riepilogate le principali caratteristiche morfologiche ed idrologiche dei tre bacini.

Il bacino del Fiume Magra è rappresentativo del versante appenninico Ligure e della Toscana settentrionale. Esso ha una estensione di circa 1698.5 km² ed è costituito da un sistema di due vallate tra loro parallele: ad occidente la valle del Fiume Vara, suo principale affluente (la cui area si estende per 572 km²), ad oriente l'alta media valle del Fiume Magra. Le litologie affioranti nel sottobacino del Vara sono a costituzione prevalentemente arenacea ed in subordine argillitico-marnosa, alle quali si aggiungono litologie calcaree ed in subordine metamorfiche - magmatiche (versante NW delle Alpi Apuane) nel bacino del Magra.

Il Fiume Panaro è scelto come rappresentativo del

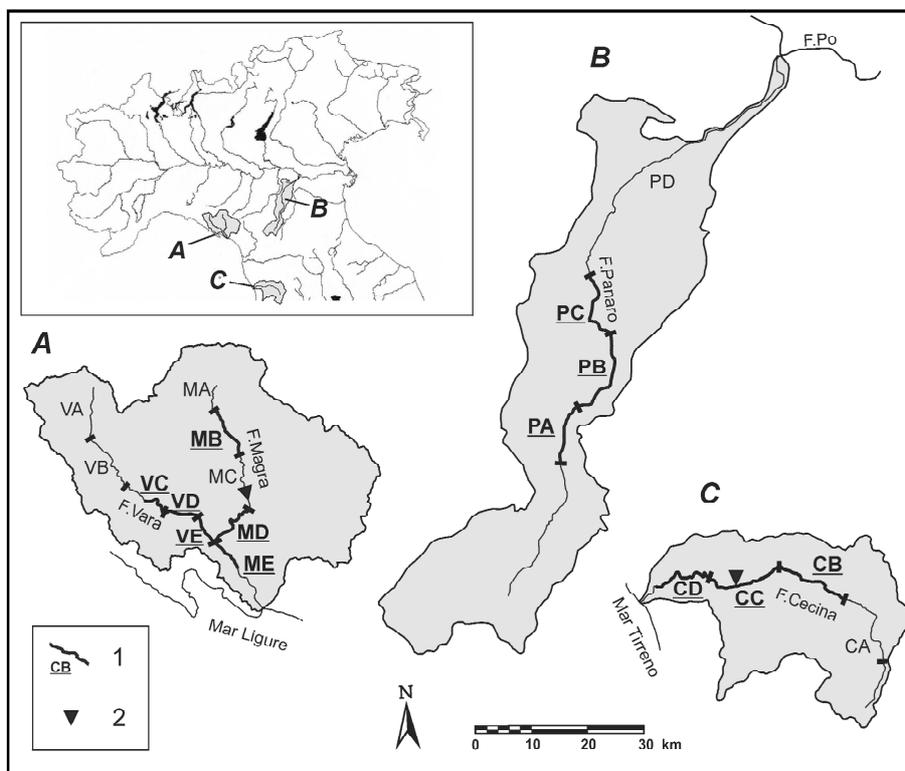


Figura 1 - Bacini e tratti di studio. A: bacino del F. Magra; B: bacino del F. Panaro; C: bacino del F. Cecina. 1: Tratti di studio; 2: stazioni di misura idrometriche presenti lungo il F. Magra e F. Cecina.

Catchments and study reaches. A: Magra R. catchment; B: Panaro R. catchment; C: Cecina R. catchment. 1: Study reaches; 2: gauging stations along Magra and Cecina Rivers.

versante padano dell'Appennino Tosco-Emiliano. Il bacino ha una estensione di circa 1783 km², simile quindi a quella del F. Magra, con una forma spiccatamente allungata in direzione SW-NE. La fascia collinare e montuosa è interessata da litologie prevalentemente arenacee ed argilloso marnose, mentre la fascia di pianura è costituita da depositi recenti prevalentemente alluvionali.

Il Fiume Cecina è scelto come rappresentativo della Toscana centro - meridionale, e si diversifica dagli altri casi anche per le condizioni climatiche leggermente differenti, presentando caratteristiche più marcate di clima mediterraneo (temperato piovoso con estate asciutta e calda). Il bacino ha una estensione di circa 905 km², quindi è di dimensioni significativamente inferiori rispetto agli altri due casi; presenta un rilievo prevalentemente collinare, con rilievi meno accentuati rispetto alla catena appenninica. Le porzioni più alte sono costituite da rocce prevalentemente calcareo - argillitiche, mentre la fascia collinare ed il fondovalle sono impostati in litotipi prevalentemente di natura pelitica costituiti da depositi lacustri, marini e fluviali dei complessi neogenico - quaternari.

2.2 Caratteristiche morfo-sedimentarie degli alvei fluviali

Sulla base di una prima osservazione delle foto aeree e di una ricognizione di campo iniziale, ognuno dei tre corsi d'acqua studiati è stato suddiviso in una serie di tratti con caratteristiche morfologiche relativamente omogenee, con particolare riferimento ai due seguenti aspetti: (a) morfologia del fondovalle (ampiezza, direzione della valle e grado di confinamento del fiume); (b) morfologia planimetrica dell'alveo. In particolare, sono stati in primo luogo distinti i principali tratti (ad es. MA, MB, ..., ME per il F. Magra), in base prevalentemente alla morfologia del fondovalle, e successivamente ogni tratto è stato ulteriormente suddiviso in sottotratti (ad es. MB1, MB2, ..., ME1, ME2) considerando con maggior dettaglio la forma planimetrica dell'alveo e le discontinuità idrologiche naturali in relazione alla presenza dei maggiori affluenti. L'analisi delle variazioni morfologiche, in particolare di quelle di larghezza, si è successivamente concentrata solo su alcuni di questi tratti o sottotratti (Tab. 2) che presentassero le seguenti caratteristiche: (1) alvei alluvionali a fondo mobile senza significative costrizioni naturali da parte

Tabella 1 - Caratteristiche morfologiche ed idrologiche generali dei bacini di studio. A: area del bacino (in parentesi l'area sottesa dalla stazione di misura delle portate); L: lunghezza del fiume; ΔH: dislivello del bacino; P: precipitazioni medie annue; q_{med}: portata giornaliera media annua; Q_{max}: portata massima.

General morphological and hydrological characteristics of the study basins. A: drainage basin area (in parentheses the drainage basin areas upstream of the gauging stations to which the discharges are referred); L: river length; ΔH: basin relief; P: mean annual rainfall; q_{med}: mean annual daily discharge; Q_{max}: maximum peak discharge.

Fiume	A (km ²)	L (km)	ΔH (m)	P (mm)	q _{med} (m ³ /s)	Q _{max} (m ³ /s)
Magra	1698.5 (932)	69.5	1639	1707	40.8	1440
Vara	572 (205)	65	1603	1770	8.3	518
Panaro	1783 (1036)	165	2157	1017	19	1400
Cecina	905 (634)	53	1018	944	7.6	1030

Tabella 2 - Caratteristiche morfologico - sedimentarie generali dei tratti di studio.

General morphological - sedimentary characteristics of the study reaches.

Fiume	Lunghezza tratto di studio (km)	Morfologia alveo	Pendenza fondo (%)	D ₅₀ sedimenti fondo (mm)	Tipi di sponde
Magra superiore (MB)	10	Transizionale (<i>wandering</i>)	0.86 - 0.95 Media: 0.9	45.3 - 90.9 Media: 62.3	principalmente non coesive (ghiaia grossolana)
Magra inferiore (MD2-ME1)	11	Transizionale (<i>wandering</i>)	0.15 - 0.42 Media: 0.24	20.9 - 39.7 Media: 29.4	principalmente composite (ghiaia basale, livello coesivo superiore)
Vara medio-inferiore (VC2-VD, VE)	22	Sinuoso (VC2-VD) - transizionale (<i>wandering</i>) (VE)	0.28 - 0.47 Media: 0.37	12.4 - 52.3 Media: 38.4	da non coesive (ghiaia grossolana) (VC2-VD) a composite (ghiaia basale, livello coesivo superiore) (VE)
Panaro medio (PA, PB, PC)	38	da transizionale (PA) a sinuoso-meandriforme (PC)	0.05 - 0.4 Media: 0.2	27.1 - 90.0 Media: 49.0	da composite (ghiaia basale, livello coesivo superiore) a coesive
Cecina medio-inferiore (CB, CC, CD1)	40	Transizionale (<i>wandering</i> - sinuoso con barre alternate)	0.21 - 0.5 Media: 0.3	11.6 - 34.4 Media: 18.1	da non coesive (ghiaia) a composite (ghiaia basale, livello coesivo superiore)

dei versanti (alvei non confinati); (2) sono stati evitati tratti eccessivamente controllati da opere idrauliche (in particolare i tratti finali di tutti e tre i casi di studio: PD, ME2, CD2) per i quali le variazioni planimetriche fossero state condizionate o completamente impedita dalla presenza di sponde fisse.

E' stata effettuata una campagna di misura delle granulometrie dell'alveo, ai fini di una caratterizzazione generale delle dimensioni granulometriche e delle loro variazioni spaziali. Le misure sono state condotte attraverso il metodo di campionamento statistico (*pebble counts*) (WOLMAN, 1954; BUNTE & ABT, 2001), con stendimenti effettuati sulle superfici di barre attive emerse. Tali misure hanno riguardato l'intera lunghezza dei fiumi Magra, Vara e Cecina (per lunghezze dell'ordine dei 40-50 km), mentre per il F.Panaro i rilievi granulometrici sono stati limitati ai tratti PA e PB (lunghezza di circa 20 km). Il principale risultato di tali misure, in termini di variazioni spaziali del diametro medio dei sedimenti (D_{50}), è riportato in Figura 2: si osservano delle oscillazioni relativamente forti, rispetto al trend discendente verso valle, riconducibili principalmente agli apporti laterali e, nel caso del Panaro, alla presenza di numerose opere trasversali. Il range di variabilità generale è compreso tra i 10 e 90 mm circa, con i sedimenti relativamente più fini presenti lungo il F.Cecina (D_{50} compresi tra 13.7 e 45.3 mm).

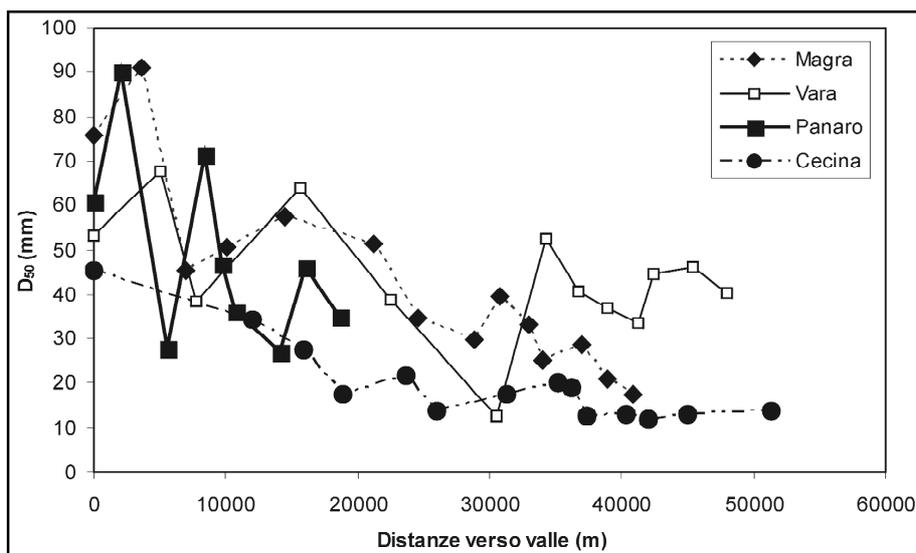


Figura 2 - Andamento spaziale del diametro medio dei sedimenti lungo i fiumi studiati.
Spatial trend of median diameter of bed sediments along the study rivers.

Un riepilogo delle caratteristiche morfologiche e sedimentarie complessive dei tratti di studio è riportato in Tabella 2. E' possibile notare come i tratti di studio presentino caratteristiche simili in termini di morfologie, con prevalenza di tipologie transizionali (*wandering* o sinuoso a barre alternate), eccetto per il tratto inferiore del Panaro (PC), caratterizzato da una morfologia a canale singolo sinuoso-meandriforme. Le pendenze del fondo sono piuttosto variabili, con valori dell'ordine di 0.004 - 0.009 nei tratti medio alti (MB, PA, CB) a valori dell'ordine di 0.0005 - 0.002 nei tratti inferiori (ME, PC, CD).

2.3 Impatti antropici

In Tabella 3 si riporta un quadro riepilogativo dei

Tabella 3 - Riepilogo dei principali tipi di impatti antropici e relative epoche per i casi di studio.

Summary of the main human impacts and relative periods for the study cases.

Fiume	Dighe e area del bacino a monte (%)	Opere trasversali (soglie, briglie, traverse) nei tratti di studio	Periodo di Intensa escavazione di sedimenti	Costruzione di argini e di protezioni di sponda	Rimboschimenti nel bacino	Sistemazioni idraulico-forestali nel bacino
Magra	3 piccole dighe lungo affluenti (metà del XX secolo) per energia idroelettrica: area a monte circa 4 %	Alcune traverse nel tratto inferiore (seconda metà XX secolo)	anni '60 - '70	dagli anni '20 realizzazione di pennelli lungo i tratti inferiori (MD2-ME1)	primi decenni del XX secolo	primi decenni del XX secolo
Vara	1 diga nel tratto medio (anni '30): area a monte 43 %	Soglie nel tratto inferiore (VE) (anni '80)	anni '60 - '70	dagli anni '20 realizzazione di pennelli lungo il tratto inferiore (VE)	primi decenni del XX secolo	primi decenni del XX secolo
Panaro	1 piccola diga lungo affluente (metà del XX secolo): area a monte circa 3 %	Numerose briglie nel tratto medio (PA, PB) (principalmente anni '70 - '80) e opera derivazione cassa di espansione (PC) (anni '80)	anni '60 - '90	anni '20 - '60	primi decenni del XX secolo	primi decenni del XX secolo, continuati fino a fine anni '80
Cecina	-	Alcune traverse nel tratto medio - inferiore (XIX e XX secolo)	anni '70	Argini e pennelli discontinui durante i primi decenni del XX secolo lungo il tratto medio-inferiore (CC, CD)	primi decenni del XX secolo	primi decenni del XX secolo

principali tipi di interventi e disturbi antropici che hanno potuto avere influenza sulla dinamica fluviale dei corsi d'acqua studiati nel periodo di indagine. Tutti i casi di studio sono stati interessati in linea di massima dagli stessi tipi di impatti, ad eccezione delle dighe e delle opere trasversali lungo i tratti di studio, assenti solo nel caso del F. Cecina

L'impatto più forte è stato senza dubbio l'intensa escavazione di sedimenti soprattutto lungo il F. Panaro, in tutto il tratto di studio, e lungo i tratti inferiori del F. Vara e soprattutto del F. Magra, a valle della loro confluenza. Alcuni dati possono risultare utili per meglio comprendere l'impatto rilevante prodotto da tale attività. Per quanto riguarda i fiumi Magra e Vara, è stato stimato che i quantitativi estratti complessivamente nei loro tratti vallivi tra 1958 e 1973 si aggirano attorno a 24.400.000 m³ (CAVAZZA & PREGLIASCO, 1981), a fronte di un trasporto solido al fondo medio annuo, per il tratto inferiore del F. Magra, che è stato stimato essere dell'ordine di 30.000 - 36.000 m³/anno (CAVAZZA & PREGLIASCO, 1981; RINALDI, 2007). Nel caso del F. Panaro, il periodo di massima intensità delle escavazioni è stato tra il 1960 ed il 1980, con quantitativi estratti, secondo i dati ufficiali, di circa 5.900.000 m³ tra 1962 e 1980, e con il picco annuo raggiunto nel 1973 con 720.000 m³ circa. Non esistono stime sul trasporto solido di questo corso d'acqua, ma certamente il rapporto tra tassi di escavazione e di trasporto al fondo, dal quale dipende molto il tipo e l'intensità della risposta morfologica dell'alveo (RINALDI *et al.*, 2005b), sono anche in questo caso molto elevati.

Per quanto riguarda il F. Cecina, non esistono dati o informazioni precise relative a questa attività. Si può certamente affermare che tale fiume è stato meno interessato dall'escavazione di sedimenti, rispetto ai casi precedenti, e che questa attività si è comunque concentrata durante i primi anni '70, in concomitanza con la realizzazione di varie infrastrutture e vie di comunicazione nelle aree limitrofe.

3. DATI RACCOLTI E METODI

Un riepilogo di tutti i dati e materiali utilizzati è

riportato in Tabella 4. I metodi impiegati consistono in: (a) confronto di cartografie storiche e foto aeree; (b) confronto dei rilievi topografici; (c) rilevamenti geomorfologici di campo.

Le foto aeree sono state elaborate attraverso il software ArcGis (ArcInfo), il quale ha permesso di rettificare e georeferenziare le immagini in modo da poterle sovrapporre tra loro ed effettuare le misure dei parametri di interesse. Per ogni anno disponibile, è stato tracciato l'asse dell'alveo attivo e sono state definite sezioni ad esso ortogonali con passo variabile a seconda dei casi di studio. Per quanto riguarda i fiumi Vara e Magra, si sono in parte utilizzate misure già effettuate in studi precedenti (RINALDI *et al.*, 2005a; RINALDI, 2005) per i quali sono state impiegate le sezioni topografiche del 1989, aventi un passo di 200 - 250 m circa, pari a circa da 1 a 2 volte la larghezza dell'alveo attuale. Per il F. Panaro ed il F. Cecina si è preferito effettuare le misure con un passo rispettivamente di 50 m e 40 m, cioè pari a circa da 0.5 a 1 volta la larghezza attuale. È stata misurata sia la larghezza totale, comprensiva cioè di eventuali isole vegetate, che la larghezza dell'alveo attivo, escluse le isole. Per tutti i casi di studio sono state utilizzate anche carte storiche le quali, seppure con un margine di errore superiore rispetto alle foto aeree, sono state ritenute sufficientemente attendibili, nonché fondamentali per la comprensione dei trend di larghezza di più lungo termine e soprattutto per ricavare una stima della larghezza iniziale del periodo investigato.

Per quanto riguarda i dati altimetrici, la ricostruzione delle variazioni di quota del fondo è stata effettuata limitatamente ad alcuni tratti dei fiumi Magra e Vara per i quali erano disponibili rilievi topografici relativi ad anni diversi.

Per quanto riguarda i rilievi geomorfologici di campo, sono state utilizzate le schede di rilevamento descritte da RINALDI (2008) o, per i fiumi Magra e Vara, versioni precedenti delle stesse (RINALDI, 2005). Tali schede hanno permesso, oltre alla descrizione delle caratteristiche morfologiche generali, anche di classificare le variazioni altimetriche di periodi precedenti, in base a differenze di quota tra superfici omologhe, e di

Tabella 4 - Riepilogo dei dati utilizzati.

Summary of data used.

Dati	F. Magra - F. Vara	F. Panaro	F. Cecina
Cartografie storiche (scala)	1823 (1:50.000), 1852 (1:50.000), 1877 (1:50.000), 1908 (1:25.000)	1890 (1:25.000 - 1:50.000)	1883 (1:50.000)
Foto aeree o cartografie (scala)	1937/38 (1:18.000), 1954 (1:66.000), 1971 (1:66.000), 1981 (1:66.000), 1992 (1:66.000), 1995 (1:40.000), 1999 (1:40.000), 2003/04 (1:33.000) MB, MD, ME: 2006 (1:8.000)	1934/35 (1:25.000), 1954/55 (1:33.000), 1962/69 (1:5.000), 1981 (1:33.000), 1997 (1:15.000), 2000 (1:40.000) PB: 2007 (1:7.000)	1954 (1:33.000) CD1: 1976 (1:15.000), 1986 (1:15.000), 1994 (1:33.000), 1999 (1:40.000), 2004 (1:7.500)
Rilievi topografici	MB: 1989, 2006 MD-ME: 1914, 1958, 1971, 1989, 1999/200, 2006 VD-VE: 1958, 1971, 1989, 1999/2000	1991	2004
Rilievi geomorfologici e sedimentologici	2003/06	2006/07	2005/07

valutare le tendenze attuali, in base ad una serie di variabili appositamente definite (quali differenze altimetriche tra superfici, caratteristiche delle barre, corazzamento e caratteristiche tessiturali dei sedimenti, evidenze vegetazionali, ecc.).

4. VARIAZIONI MORFOLOGICHE

4.1 Variazioni planimetriche

I trend temporali di variazioni di larghezza sono riportati in Figura 3A, dove si confrontano tra loro i dati relativi a tutti i sottotratti dei casi di studio analizzati. La prima osservazione di carattere generale che si può effettuare è la progressiva riduzione di larghezza nel tempo, almeno fino alla fine degli anni '90 circa: per i soli casi del basso Magra (MD2 ed ME1), si nota nel 1954 un temporaneo incremento di larghezza rispetto al dato precedente (1938). Dalla fine degli anni '90 in poi si nota qualche caso di inversione di tendenza con un lieve incremento di larghezza, o comunque una situazione di maggiore equilibrio.

Al fine di rendere meglio confrontabili tra loro i risultati, in un secondo grafico la larghezza è stata adimensionalizzata rispetto al valore massimo registrato nel periodo (Fig. 3B) (quest'ultimo associato sempre al primo valore di larghezza misurato sulle carte storiche). Da tale grafico è possibile più agevolmente identificare le fasi di aggiustamento generalizzabili o meno a tutti i casi di studio. Infine, nella Figura 3C si riportano i tassi medi di variazione per ognuna delle fasi di evoluzione, ed in Tabella 5 si riporta un riepilogo delle caratteristiche principali delle varie fasi. Si riepilogano di seguito le caratteristiche generali delle varie fasi: (1) Prima fase di restringimento (fase 1): caratterizzata da un restringimento molto significativo, verificatosi nella maggior parte dei casi tra fine 1800 - inizi 1900 e anni '50 - inizi anni '70; (2) Seconda fase di restringimento (fase 2): caratterizzata da un restringimento altrettanto

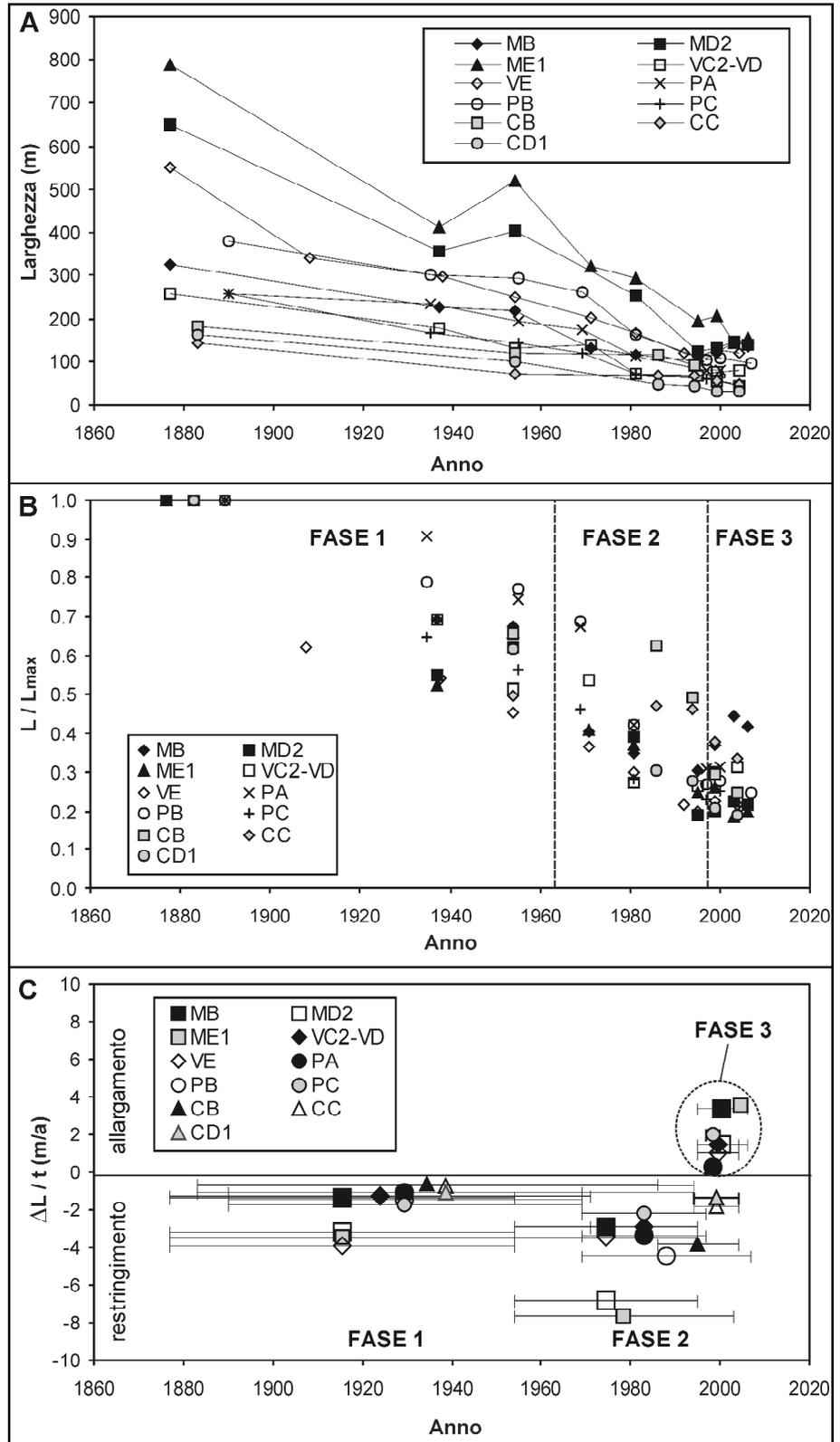


Figura 3 - Variazioni di larghezza. A: trend temporali delle larghezze. B: andamento delle larghezze (L) adimensionalizzate rispetto alla larghezza massima (L_{max}) del periodo di misure. C: tassi di variazione medi ($\Delta L/t$) per le varie fasi di aggiustamento morfologico. I simboli rappresentano il tasso di variazione attribuito al punto medio dell'intervallo di tempo, quest'ultimo rappresentato dalla linea.

Changes in channel width. A: temporal trends of channel width changes. B: trend of channel widths (L) nondimensionalised by the maximum width of the period (L_{max}). C: mean rates of width change ($\Delta L/t$) for each of the phases of channel adjustments. Symbols represent the rates associated to the mean point of the time intervals, the latter represented by the lines.

significativo ma, essendosi manifestato in un intervallo di tempo inferiore, con tassi di variazione in genere più elevati. Nella maggior parte dei casi la fase 2 si è manifestata dalla fine della precedente a fine anni '90; (3) Fase di allargamento (fase 3): non è sempre presente, in quanto alcuni tratti sono tuttora in restringimento. Quando presente, è iniziata a fine anni '90 ed è caratterizzata da un aumento di larghezza, con tassi in alcuni casi anche molto significativi, oppure da un aumento seguito poi da una nuova riduzione (ma il cui valore finale è comunque maggiore rispetto al minimo raggiunto alla fine della fase 2).

Rispetto a tale modello generale, si rimarcano di seguito alcuni dei principali discostamenti: (1) per il F. Panaro nel tratto PB, la fase 2 di restringimento è ancora in atto, dopo una lieve inversione di tendenza tra 1997 e 2000. Per i tratti PA e PC non è stato possibile verificare se esistesse tale restringimento in quanto non era disponibile il volo aereo 2007, per questo motivo l'esistenza di una effettiva fase 3 di riallargamento è incerta. (2) Il F. Cecina rappresenta un caso che si discosta ulteriormente dagli altri, in quanto: (a) la fase 1 si prolunga fino a fine anni '80 - inizi anni '90; (b) analogamente al tratto PB, la fase 2 di restringimento è

ancora in atto in tutti e tre i tratti di studio (CB, CC e CD1). In sintesi, sembra che le fasi evolutive lungo il F. Cecina si siano verificate e si stiano tuttora verificando con un certo sfasamento (ritardo) rispetto al modello generale.

4.1 Variazioni altimetriche

In Tabella 6 si riporta un riepilogo delle variazioni di quota del fondo rispetto a fine 1800, stimate sulla base dei rilievi topografici disponibili (F. Magra e F. Vara) o valutate in base ad osservazioni di campo. Si osserva come i valori più alti di abbassamento si registrano lungo il tratto inferiore del F. Magra e lungo tutti i tratti di studio del F. Panaro, laddove è stata più forte l'attività di escavazione di sedimenti durante i decenni passati. I valori più contenuti di abbassamento sono invece osservati lungo i tratti medi del F. Vara e del F. Cecina. Per quanto riguarda le tendenze attuali, eccetto per il F. Magra per il quale erano disponibili rilievi topografici eseguiti negli ultimi 10 anni, in tutti gli altri casi le valutazioni si sono basate esclusivamente su osservazioni di campo, le quali non sono in grado di fornire delle stime ma solo di classificare la tendenza prevalente. In generale si sono osservate prevalentemente situa-

Tabella 5 - Riepilogo delle variazioni di larghezza suddivise per fasi evolutive. T1, T2 e T3: intervalli di tempo relativi alle fasi 1, 2 e 3 rispettivamente; ΔL : variazione di larghezza; $\Delta L/(L_{max}-L_{min})$: rapporto tra variazione di larghezza in una fase evolutiva e differenza tra larghezza massima e minima dell'intero periodo.

Summary of channel width changes for each phase of evolution. T1, T2, T3: time intervals of the phases 1, 2, and 3 respectively; ΔL : width change; $\Delta L/(L_{max}-L_{min})$: ratio between width change of a phase of evolution and difference between maximum and minimum width of the entire period.

Tratto	Fase 1			Fase 2			Fase 3		
	T1	ΔL (m)	$\Delta L/(L_{max}-L_{min})$ (%)	T2	ΔL (m)	$\Delta L/(L_{max}-L_{min})$ (%)	T3	ΔL (m)	$\Delta L/(L_{max}-L_{min})$ (%)
MB	1877-1954	-105.9	-47	1954-1995	-120.3	-53	1995-2006	37.1	16
MD2	1877-1954	-246.9	-47	1954-1995	-279.5	-53	1995-2006	15.5	3
ME1	1877-1954	-268.5	-42	1954-2003	-375.3	-58	2003-2006	10.6	2
VC2-VD	1877-1971	-118.2	-62	1971-1995	-70.9	-38	1995-2004	13.3	7
VE	1877-1954	-301.0	-68	1954-1995	-140.2	-32	1995-2004	9.4	2
PA	1890-1969	-84.1	-47	1969-1997	-94.9	-53	1997-2000	0.8	0.4
PB	1890-1969	-118.3	-41	1969-2007	-167.7	-59	-	-	-
PC	1890-1969	-137.4	-69	1969-1997	-60.5	-31	1997-2000	5.9	3
CB	1883-1986	-68.9	-50	1986-2004	-69.4	-50	-	-	-
CC	1883-1994	-76.6	-81	1994-2004	-18.2	-19	-	-	-
CD1	1883-1994	-116.6	-89	1994-2004	-13.6	-10	-	-	-

Tabella 6 - Riepilogo delle variazioni di quota del fondo (da dati topografici disponibili e rilievi di campo).

Summary of bed-level changes (from available topographic data and field surveys).

Fiume	Tratto	Variazioni stimate rispetto a fine 1800	Tendenze attuali (ultimi 10 anni circa)
Magra	MB	2 - 4 m	Equilibrio / sedimentazione
	MD2-ME1	5 - 8 m	Equilibrio / sedimentazione
Vara	VC2-VD	1 - 3 m	Equilibrio / sedimentazione
	VE	2 - 4 m	Equilibrio / sedimentazione
Panaro	PA	4 - 6 m	Equilibrio
	PB	6 - 10 m	Equilibrio
	PC	4 - 6 m	Equilibrio
Cecina	CB	1 - 2 m	Equilibrio (sedimentazione)
	CC-CD1	2 - 3 m	Equilibrio (sedimentazione)

zioni di equilibrio e/o sedimentazione, quest'ultima spesso localizzata in alcuni punti o sottotratti piuttosto che generalizzata. Per quanto riguarda il F. Panaro non sono state osservate evidenze generalizzate di sedimentazione o di incisione, pertanto la situazione dominante è stata classificata come di equilibrio. Tale situazione di equilibrio del fondo è tuttavia fortemente condizionata dalla presenza di numerose traverse lungo il tratto di studio, in assenza delle quali è possibile che il fondo sarebbe ancora in fase di incisione. Anche nel caso del F. Cecina la situazione più frequente è stata quella di equilibrio, seppure spesso sono state osservate evidenze di situazioni di sedimentazione piuttosto localizzata in alcuni punti.

Le informazioni disponibili sull'evoluzione temporale della quota del fondo sono limitate solo ai tratti inferiori dei fiumi Magra e Vara, per i quali si dispone di un numero relativamente elevato di profili del fondo.

A titolo di esempio si riporta in Figura 4 il trend evolutivo della quota del fondo (media del tratto) relativa ai due tratti MD2 ed ME1 del F. Magra: è possibile osservare in entrambi i casi un andamento piuttosto simile di abbassamento del fondo tra 1914 e 1989, con un incremento del tasso di abbassamento successivo al 1958 (più evidente nel sottotratto ME1). Per quanto riguarda gli anni successivi al 1989, si osserva in entrambi i casi una inversione di tendenza, ancora in atto nel sottotratto MD2, mentre nel sottotratto ME1 l'ultimo rilievo (2006) registra una nuova flessione della quota del fondo. Risulta particolarmente interessante riportare sugli stessi grafici l'andamento temporale della larghezza dell'alveo, in modo da poter verificare l'esistenza di interazioni tra i due tipi di aggiustamento morfologico. Per quanto riguarda le modifiche precedenti al 1989, si nota come restringimento ed abbassamento procedono in maniera analoga, eccezione fatta per l'incremento di larghezza nel 1954 già osservato precedentemente. Successivamente al 1989, è ancora più interessante osservare come ci sia una buona corrispondenza tra inversioni di tendenza del fondo e di larghezza: ad un aumento di larghezza corrisponde un innalzamento della quota del fondo e viceversa, ed è anche interessante notare che le variazioni di quota sono molto più significative, se rapportate alla variazione totale del periodo, rispetto alle variazioni di larghezza.

5. SINTESI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

I risultati di questa ricerca permettono di avere a disposizione un numero più ampio di casi di studio per i quali sono ben definiti i trend di aggiustamento morfologico, rispetto a quanto già noto sull'evoluzione di alvei fluviali dell'Appennino Settentrionale (RINALDI, 2003; RINALDI et al., 2005a). In Figura 5 si riporta schematicamente l'evoluzione dei casi di studio analizzati. Tale modello di evoluzione ripercorre quello già proposto da SURIAN & RINALDI (2004), il quale si riferiva a cinque tratti di fiumi dell'Italia Settentrionale (tra i quali il tratto del F. Vara qui indicato come VE) a morfologia inizialmente a canali intrecciati. Tuttavia il modello proposto è più articolato, volendo evidenziare alcune differenze osservate tra i vari casi di questo studio. In generale, si distinguono quattro stadi di evoluzione, descritti sinteticamente come segue: (1) Stadio I: morfologia iniziale di fine 1800 - inizi 1900, a canali intrecciati o *wandering*; (2) Stadio II: alveo parzialmente inciso e ristretto del periodo 1950 - 1970 circa, a seguito della prima fase di aggiustamento; (3) Stadio III: alveo con incisione e restringimento massimi di fine anni '90 o ancora in atto, a seguito della fase 2 di variazioni più intense; (4) Stadio IV: alveo con inizio di inversione di tendenza e parziale recupero morfologico.

L'evoluzione dei Fiumi Magra e Vara coincide esattamente con quanto già rappresentato nel modello di SURIAN & RINALDI (2003), mentre i F. Panaro e F. Cecina denotano alcune differenze. Il F. Panaro subisce una incisione mediamente più forte rispetto ai casi precedenti (in particolare nel tratto PB), presenta nello stadio III una morfologia solo in alcuni tratti a barre alternate, mentre in altri casi raggiunge una configurazione a canale singolo quasi priva di barre. Lo stadio IV di parziale recupero morfologico è possibile per i tratti PA e PC, mentre il tratto PB è tuttora nello stadio III. Nel caso del F. Cecina, la morfologia iniziale è meglio descritta come *wandering* (seppure in periodi ancora precedenti era probabilmente a canali intrecciati e continua ad esserlo localmente nello stadio I) ed evolve verso una configurazione a barre alternate e, soprattutto nel tratto CC, l'ulteriore riduzione di larghezza e l'aumento di sinuosità stanno determinando una possibile evoluzione verso una morfologia meandriforme (con

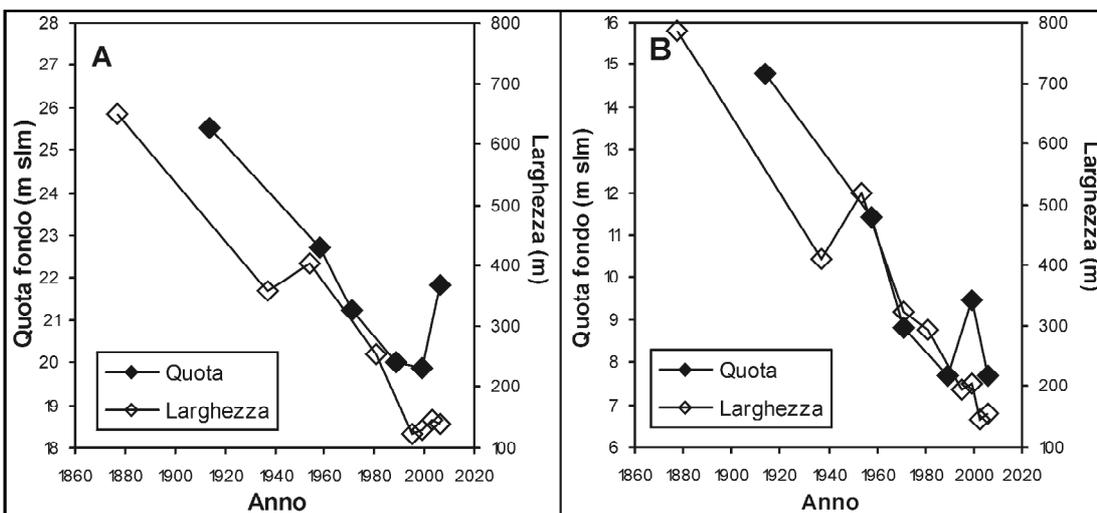


Figura 4 - Trend temporali delle quote del fondo e delle larghezze dell'alveo lungo il tratto inferiore del F. Magra. A: tratto MD2; B: tratto ME1.

Temporal trends of bed-level changes along the lower Magra. A: MD2 reach; B: ME1 reach.

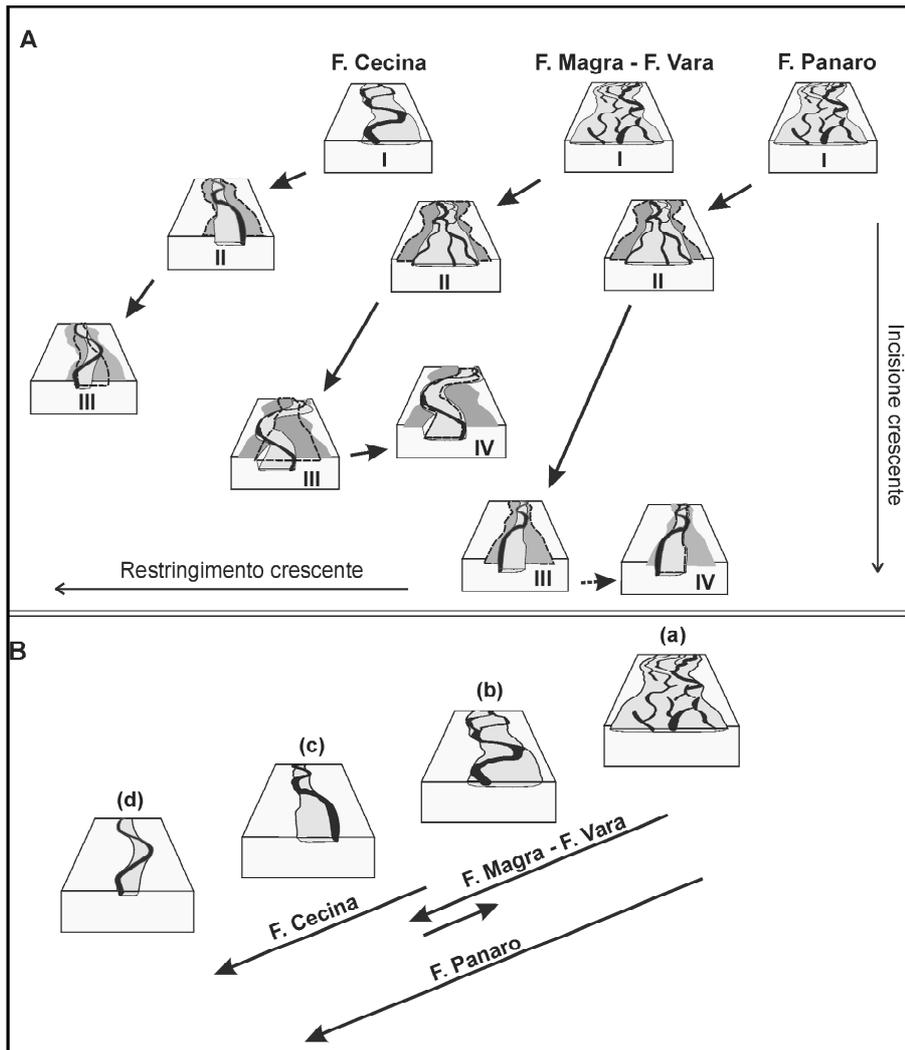


Figura 5 - Riepilogo delle variazioni morfologiche. A: modello evolutivo dei tre casi di studio. B: variazioni della morfologia d'alveo. Le frecce rivolte verso il basso indicano le variazioni di pattern durante le fasi di incisione e restringimento (fasi 1 e 2); la freccia rivolta verso l'alto indica la fase 3 di parziale recupero morfologico (solo per F. Magra - F. Vara). Morfologie d'alveo: (a) a canali intrecciati; (b) wandering; (c) sinuoso a barre alternate; (d) meandriforme a barre di meandro.

Summary of morphological change. A: model of channel evolution for the three study cases. B: changes in channel morphology. The arrows turned down point out the changes in channel pattern during the phases of incision and narrowing (phases 1 and 2); arrow turned up point out the phase 3 of partial morphological recovery (only for Magra R. - Vara R.). Channel morphologies: (a) braided; (b) wandering; (c) sinuous with alternate bars; (d) meandering with point bars.

barre di meandro). L'indice di sinuosità risulta infatti significativamente aumentato tra il 1986 ed il 2004, soprattutto nel tratto CC, mentre il tratto CB è quello in cui si è avuto un maggiore restringimento accompagnato ad una trasformazione morfologica da *wandering* (localmente a canali intrecciati) a canale sinuoso a barre alternate.

La Figura 5B mette schematicamente in evidenza una caratteristica comune ai vari casi di studio. Si possono considerare nell'ordine le seguenti quattro morfologie, in senso decrescente di larghezza: (a) canali intrecciati; (b) *wandering*; (c) sinuoso a barre alternate; (d) meandriforme a barre di meandro. Quello che si è osservato è un passaggio di morfologie seguendo una traiettoria comune (da a verso d), con la morfologia

finale che è funzione di quella iniziale e dell'entità delle variazioni. Ad esempio, i fiumi Magra, Vara e Panaro partono tutti da una morfologia a canali intrecciati ma il Panaro subisce un grado di trasformazione maggiore, mentre il F. Cecina parte da una morfologia *wandering* e si avvicina ad una morfologia meandriforme. Nel caso in cui esiste una fase di parziale recupero morfologico (ad esempio per F. Magra e F. Vara), la tendenza è quella di ripercorrere la stessa traiettoria in senso contrario.

E' opportuno a questo punto porre la questione di quali siano le cause di tali variazioni, ed in particolare quali siano le variabili (ad es. portate liquide e/o solide) dalle cui modifiche dipendano tali tendenze passate ed attuali. L'associazione causa - effetto tra variazioni morfologiche osservate ed impatti antropici è evidente (Tab. 3 e Fig. 6). Come già osservato precedentemente (si veda ad es. RINALDI, 2003; SURIAN & RINALDI, 2003), la fase 1 di abbassamento e restringimento è associabile a condizionamenti prevalentemente a scala di bacino, mentre la fase 2 è associabile soprattutto al periodo di intensa escavazione di sedimenti dagli alvei. Più difficile è identificare possibili fattori naturali che possano avere contribuito almeno in parte a tali modifiche. Se si considerano ad esempio le variazioni climatiche, l'unico parametro che può essere realmente preso in considerazione è la precipitazione, in quanto le portate liquide sono a loro volta influenzate da fattori antropici. Per quanto riguarda il bacino del F. Magra,

sono state analizzate numerose serie storiche di precipitazioni totali annue relative a diverse stazioni pluviometriche (RINALDI, 2005), e da tale analisi non si denotano tendenze significative, osservandosi solo una riduzione molto modesta delle precipitazioni nel tempo. Analoghe osservazioni sono state fatte per il bacino del F. Arno (BILLI & RINALDI, 1997; AGNELLI *et al.*, 1998). Non è ancora possibile invece fare considerazioni sulle possibili variazioni climatiche in atto e sul loro eventuale ruolo nei confronti della fase di recupero morfologico. Informazioni ancora più limitate sono quelle relative ad una possibile influenza della tettonica attiva, ma sulla base della letteratura esistente (SURIAN & RINALDI, 2003) esiste un sostanziale accordo nel ritenere che tale fattore possa influire solo in piccola parte, ma certamente

non può spiegare variazioni morfologiche così significative come quelle osservate negli ultimi 100 anni circa.

I fattori antropici hanno potuto determinare le variazioni morfologiche osservate in vari modi: (a) modificando direttamente l'alveo (ad esempio tramite pennelli, canalizzazioni ed in parte escavazione di sedimenti); (b) modificando le variabili guida (portate liquide e solide) le cui variazioni possono avere indotto aggiustamenti morfologici dell'alveo. Per quanto riguarda il secondo caso, si può osservare che, nei casi di studio in esame, la gran parte degli impatti antropici ha avuto un effetto prevalentemente sulle portate solide, piuttosto che su quelle liquide. Le dighe possono avere avuto una certa influenza riducendo anche le portate di piena (oltre che le portate solide), ma tale effetto potrebbe essere stato significativo solo per il F. Vara (negli altri casi i bacini sottesi da dighe sono poco significativi), mentre tutti gli altri tipi di interventi non hanno significative influenze sulle portate di picco. Per le uniche due stazioni di misura (F. Cecina e F. Magra) che hanno registrato con continuità le portate massime annuali, è stato verificato che non esistono anomalie particolari nell'andamento delle portate nell'intervallo in cui si sono verificate le maggiori

variazioni morfologiche (RINALDI, 2005). Analoghe osservazioni erano state fatte per il F. Arno (RINALDI, 2003), per il quale non è osservabile alcuna evidenza di variazioni significative nell'intensità e frequenza di eventi di piena in grado di spiegare l'accelerazione della fase di incisione nella seconda metà del XX secolo. È pertanto evidente che la variabile guida principale dalle cui variazioni sono dipesi gli aggiustamenti morfologici è rappresentata dalle portate solide. Le variazioni di portate solide possono essere principalmente avvenute: (1) a scala di bacino, attraverso variazioni di uso del suolo (rimboschimenti) e realizzazione di briglie; (2) riduzione della quantità di sedimenti disponibili in alveo per il trasporto solido al fondo, a causa dell'asportazione diretta di sedimenti dagli alvei. La relazione tra variazioni di portate solide e di larghezza dell'alveo è consistente con quanto riportato in letteratura: in particolare, il modello di aggiustamenti morfologici proposto da SCHUMM (1977) prevede, seppure solo in termini qualitativi, una riduzione della larghezza in conseguenza di una riduzione delle portate solide e viceversa. La riduzione di portate solide può non essere l'unico fattore che ha determinato le fasi di restringimento: un certo ruolo può

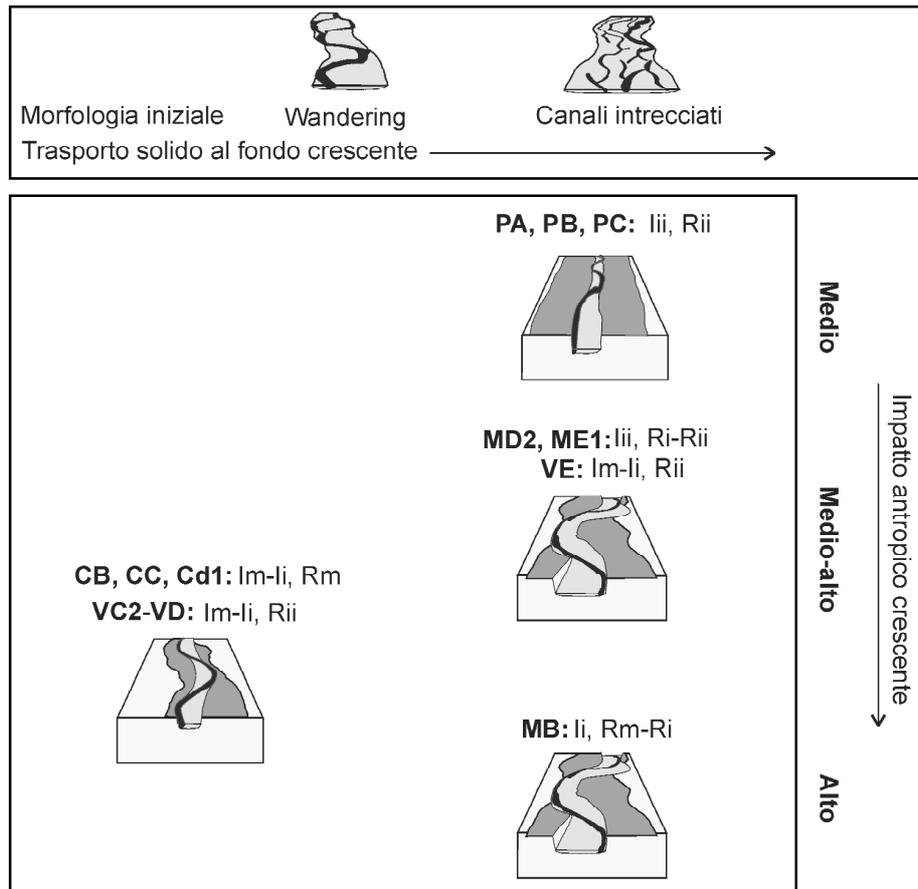


Figura 6 - Schema riepilogativo delle variazioni morfologiche complessive (rispetto alla situazione iniziale di fine 1800) in funzione della morfologia iniziale e del grado relativo di impatto antropico. Classi di incisione: Im) moderata (tra 1 e 2 m); li) intensa (tra 2 e 4 m); lii) molto intensa (>4 m). Classi di restringimento: Rm) moderato (tra 20 e 50%); Ri) intenso (tra 50 e 70%); Rii) molto intenso (>70 %).

Summary sketch of the overall morphological changes (compared to the initial situation at the end of 1800) as a function of the initial morphology and the relative degree of human impact. Classes of incision: Im) moderate (between 1 and 2 m); li) intense (between 2 and 4 m); lii) very intense (>4 m). Classes of narrowing: Rm) moderate (between 20 and 50%); Ri) intense (between 50 and 70%); Rii) very intense (>70 %).

essere stato giocato anche dalla realizzazione di pennelli ed altre difese di sponda. Questo è particolarmente evidente per il basso Magra e basso Vara, dove negli anni '30 sono stati realizzati numerosi pennelli. D'altra parte tali interventi non possono essere considerati l'unica causa di restringimento, in quanto la riduzione di larghezza si è registrata anche in numerosi altri casi dove non si sono realizzati pennelli.

Un approfondimento particolare della discussione va dedicato infine alla eventuale esistenza di una fase di recupero morfologico iniziata negli ultimi anni. È necessario innanzitutto notare che tale fase, alla luce dei casi di studio qui esaminati, appare meno chiara e meno diffusa di quanto non sembrasse in precedenti studi (SURIAN & RINALDI, 2004; RINALDI et al., 2005a). I quesiti fondamentali che si pongono sono: (1) quali sono le cause dell'inversione di tendenza, laddove si è verificata; (2) perché non si è verificata in tutti i casi. Nell'ambito dei casi di studio analizzati, una inversione di tendenza della larghezza si è verificata con chiarezza nei F. Magra e F. Vara, seppure ad una fase di riallargamento piuttosto marcato iniziata generalmente intorno al 1995 è quasi sempre seguita una nuova riduzione di

larghezza negli ultimi anni. La Figura 4 mostra chiaramente come tali oscillazioni di larghezza siano strettamente legate anche a variazioni della quota del fondo. Un contributo a tali tendenze recenti può essere certamente legato a due eventi di piena di forte intensità verificatisi nel 1999 e nel 2000, i quali hanno certamente causato la riattivazione di numerosi processi erosivi e di produzione di sedimenti a scala di bacino. Va tuttavia notato che l'inversione di tendenza non può essere attribuita esclusivamente a tali piene, in quanto essa era già iniziata tra il 1995 ed il 1999. E' presumibile quindi che tali primi segnali di allargamento siano legati ad un inizio di riattivazione di processi erosivi, avvenuto anche durante piene di non eccezionale intensità verificatesi in quegli anni, che ha fatto seguito, con un certo ritardo, al termine della fase di intensa attività di escavazione di sedimenti. A ciò si aggiunge il fatto che, durante questi ultimi anni, le rimozioni di sedimenti e le protezioni di sponda sono state molto ridotte e limitate a situazioni localizzate. Piuttosto inaspettata appare la riduzione di larghezza manifestatasi in gran parte dei casi (seppure talora molto limitata) durante gli ultimi anni. Da una attenta analisi da foto aeree delle situazioni in cui tale riduzione si è manifestata, essa appare sostanzialmente legata ad una parziale ricolonizzazione da parte di vegetazione di superfici relativamente meno attive che si erano probabilmente rimodellate durante gli eventi del 1999-2000, a causa dell'assenza di eventi di piena successivi altrettanto intensi. Pertanto, si può concludere che per i fiumi Magra e Vara non si può parlare di una fase attuale univoca di riallargamento, ma piuttosto di una fase di oscillazioni morfologiche nella direzione di un parziale recupero (inversione di tendenza rispetto alla fase precedente), guidate dal verificarsi di eventi di piena di una certa intensità e dall'intervallo di tempo intercorrente tra eventi successivi.

Per quanto riguarda il F. Panaro, per due tratti si è verificata una lieve inversione di tendenza (tra 1997 e 2000) mentre nel caso del tratto PB, per il quale si disponeva anche del volo più recente del 2007, la tendenza risulta essere tuttora in restringimento. L'assenza di una chiara fase di recupero morfologico può essere legata ai seguenti fattori: (1) sostanziale deficit di sedimenti in alveo (si ricorda che in alcuni tratti il corso d'acqua ha eroso tutto il materasso alluvionale andando ad incidere il substrato); (2) discontinuità longitudinali (numerose briglie) che ostacolano il flusso di sedimenti; (3) attività di escavazione, che è continuata (seppure a tassi nettamente inferiori rispetto ai decenni precedenti) e che è ancora in atto. Si può pertanto dire che nel caso del F. Panaro il mancato recupero morfologico è sostanzialmente legato alla perdurante mancanza o scarsità di sedimenti tali da favorire una inversione di tendenza.

Il F. Cecina per alcuni aspetti si differenzia dai precedenti, in quanto sembra che le risposte morfologiche stiano avvenendo con un certo ritardo rispetto agli altri due casi di studio, presumibilmente perché la fase di escavazione di sedimenti più intensa è stata leggermente successiva. Un altro fattore importante può essere legato alle condizioni di energia e di trasporto solido di questo corso d'acqua, che è caratterizzato da minori portate liquide e soprattutto minori portate solide, come testimoniato dalla larghezza iniziale più ridotta e dalla stessa morfologia iniziale. L'energia del corso

d'acqua ed il trasporto solido al fondo relativamente bassi rispetto ad altri casi può ritardare la riattivazione di processi erosivi ed il recupero morfologico. L'attuale tendenza sembra verso un ulteriore restringimento ed accentuazione dei processi di sviluppo di meandri, attraverso i quali l'alveo tende ad aumentare la propria sinuosità in risposta di un deficit ancora esistente di portate solide rispetto alla capacità di trasporto. Le erosioni di sponda, associate al processo di sviluppo di meandri, stanno tuttavia favorendo un rifornimento di nuovi sedimenti che potrebbero quindi nei prossimi anni invertire la tendenza del fondo e favorire un arresto del processo di restringimento.

6. CONCLUSIONI

Le principali conclusioni che si possono trarre da questo studio sono elencate di seguito.

1. I casi di studio analizzati tendono a confermare alcune delle osservazioni fatte in studi precedenti (SURIAN & RINALDI, 2004; RINALDI *et al.*, 2005a), consentendo tuttavia di avere una casistica più ampia tale da contribuire ad un maggiore chiarimento di alcuni aspetti.
2. Per quanto riguarda l'evoluzione tra fine 1800 e anni '90, si conferma l'esistenza di due fasi successive di evoluzione, dove l'incisione del fondo ed il restringimento dell'alveo attivo sono avvenuti pressoché in contemporanea e con intensità diverse nelle due fasi.
3. La portata solida al fondo appare essere la variabile guida più importante nel determinare queste tendenze evolutive.
4. La fase attuale di allargamento appare invece meno chiara rispetto a quanto ipotizzato precedentemente, ed è piuttosto definibile come una fase di parziale recupero morfologico, caratterizzata da oscillazioni di larghezza piuttosto che da una tendenza univoca all'allargamento.
5. In alcuni casi tale fase di recupero morfologico è assente o tuttora incerta: ciò può essere legato a varie ragioni, quali (a) un intervallo di tempo più breve rispetto alla fase di massima escavazione; (b) una pressione antropica più forte (F. Panaro) che in alcuni casi determina una asportazione di sedimenti ancora significativa; (c) caratteristiche naturali dell'alveo (minore energia e minore trasporto solido al fondo) che determinano una più lenta reazione del corso d'acqua.

RINGRAZIAMENTI

Ricerca finanziata dal MIUR nell'ambito del progetto PRIN 2005 "Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali in Italia centro-settentrionale: tendenze evolutive, cause ed implicazioni applicative" (Responsabile nazionale: Nicola Surian, Responsabile U.O. Firenze: Massimo Rinaldi) e del programma MIUR 2003-07 "Incentivazione alla mobilità di studiosi stranieri e italiani residenti all'estero" (Liliana B. Teruggi). Si ringraziano G. Doretto e L. Bellacci per gli importanti contributi relativamente alle misure effettuate su F. Magra, F. Vara e F. Panaro. Si ringrazia F. Vannacci del Laboratorio di Sedimentologia del Dipartimento di Ingegneria Civile e

Ambientale di Firenze per le analisi granulometriche dei sedimenti del fondo. Si ringraziano infine M. Marchetti e P.C. Aucelli per aver contribuito a migliorare l'articolo attraverso i loro commenti costruttivi.

BIBLIOGRAFIA

- AGNELLI A., BILLI P., CANUTI P. & RINALDI M. (1998) - *Dinamica evolutiva recente dell'alveo del Fiume Arno* - Monografia CNR-GNDICI, Pubblicazione n° 1739, Pacini Editore, Pisa, 191 pp.
- BILLI P. & RINALDI M. (1997) - *Human impact on sediment yield and channel dynamics in the Arno River (central Italy)* - In: Walling D.E. & Probst J.L. (Eds), *Human Impact on Erosion and Sedimentation*, IAHS Publ.no. 245, 301-311.
- BRAGA G. & GERVASONI S. (1989) - *Evolution of the Po River: an example of the application of historic maps* - In: Petts, G.E., Moller, H., Roux, A.L. (Eds.), *Historical change of large alluvial rivers: Western Europe*, Wiley, pp. 113-126.
- BUNTE K. & ABT S.R. (2001) - *Sampling surface and sub-surface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring*. U.S.Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-74, 428 pp.
- CASTIGLIONI G.B. & PELLEGRINI G.B. (1981) - *Two maps on the dynamics of a river bed. Erosion and sediment transport measurement* - Proceedings of the IAHS Symposium, Florence, 22-26 June 1981, pp. 223-228.
- CASTALDINI D. & PIACENTE S. (1995) - *Channel changes on the Po River, Mantova Province, Northern Italy* - In: Hickin, E.J. (Ed.), *River Geomorphology*, Wiley, pp. 193-207.
- CAVAZZA S. & PREGLIASCO P. (1981) - *Sulle modificazioni dell'apporto terrigeno alla foce del Fiume Magra causate dall'uomo*. In: Antonelli, A., Cavazza, S., Cortemiglia, G.C., Egori, F., Martinelli, M., Pellegrini, N., Pregliasco, P., Raggi, G., Tra fiumi, mare e terraferma, Tipografia Zappa, Sarzana, 57-128.
- MARCHETTI M. (2002) - *Environmental changes in the central Po Plain (northern Italy) due to fluvial modifications and anthropogenic activities* - *Geomorphology*, **44**, 361-373.
- RINALDI M. (2003) - *Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy* - *Earth Surface Processes and Landforms*, **28** (6), 587-608.
- RINALDI M. (2005) - *Studio geomorfologico dei principali alvei fluviali nel bacino del Fiume Magra finalizzato alla definizione di linee guida di gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità funzionale*. Relazione Finale Convenzione di Ricerca tra Autorità di Bacino del Fiume Magra e Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze, 160 pp.
- RINALDI M. (2007) - *Approfondimenti dello studio geomorfologico dei principali alvei fluviali nel bacino del Fiume Magra finalizzato alla definizione di linee guida di gestione dei sedimenti e della fascia di mobilità funzionale*. Relazione Finale Convenzione di Ricerca tra Autorità di Bacino del Fiume Magra e Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze, 154 pp.
- RINALDI M. (2008) - *Schede di rilevamento geomorfologico di alvei fluviali*. Il Quaternario, questo volume.
- RINALDI M. & SIMON A. (1998) - *Bed-level adjustments in the Arno River, Central Italy* - *Geomorphology*, **22** (1), 57-71.
- RINALDI M., SIMONCINI C. & SOGNI D. (2005a) - *Variazioni morfologiche recenti di due alvei ghiaiosi appenninici: il F.Trebbia ed il F.Vara* - *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Suppl.VII, 313-319.
- RINALDI M., WYZGA B. & SURIAN N. (2005b) - *Effects of sediment mining on channel morphology and environment in alluvial rivers* - *River Research and Application*, **21**, 805-828.
- SCHUMM S.A. (1977) - *The Fluvial System* - Wiley, New York 338 pp.
- SURIAN N. & RINALDI M. (2003) - *Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy* - *Geomorphology*, **50** (4), 307-326.
- SURIAN N. & RINALDI M. (2004) - *Channel adjustments in response to human alteration of sediment fluxes: examples from Italian rivers* - In: *Sediment Transfer through the Fluvial System*, Proceedings Symposium held in Moscow, August 2004, IAHS Publ.288, 276-282.
- SURIAN N. (1999) - *Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy* - *Earth Surf. Process. Landforms*, **24**, 1135-1151.
- WOLMAN M.G. (1954) - *A method of sampling coarse river-bed material*. *Am.Geophys.Union.Trans.*, **35**, 951-956.

Ms. ricevuto il 7 dicembre 2007

Testo definitivo ricevuto il 17 marzo 2008

Ms. received: December 7, 2007

Final text received: March 17, 2008