

## VARIAZIONI MORFOLOGICHE DEGLI ALVEI DEI PRINCIPALI CORSI D'ACQUA VENETO-FRIULANI NEGLI ULTIMI 200 ANNI

Nicola Surian<sup>1</sup>, Luca Ziliani<sup>1</sup>, Laura Cibien<sup>1</sup>, Alberto Cisotto<sup>2</sup> & Francesco Baruffi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Geografia, Università di Padova, Via del Santo 26, 35123 Padova

<sup>2</sup>Autorità di Bacino dei fiumi dell'Alto Adriatico, Dorsoduro 3593, 30123 Venezia

e-mail: nicola.surian@unipd.it

RIASSUNTO: Surian N. et al., *Variazioni morfologiche degli alvei dei principali corsi d'acqua veneto-friulani negli ultimi 200 anni* (IT ISSN 0394-3356, 2008).

I corsi d'acqua veneto-friulani, come molti corsi d'acqua italiani, sono stati soggetti negli ultimi decenni a profonde modificazioni morfologiche, indotte da una serie di interventi antropici. Il lavoro riporta lo stato attuale delle conoscenze su cinque dei principali corsi d'acqua veneto-friulani (Brenta, Piave, Cellina, Tagliamento e Torre), ed ha lo scopo di confrontare le tendenze evolutive ed i fattori che hanno determinato gli aggiustamenti morfologici nel breve e medio termine (ultimi 200 anni). Le variazioni planimetriche, ed in particolare le variazioni di larghezza dell'alveo, sono state analizzate attraverso l'impiego della cartografia storica e delle foto aeree: per ogni corso d'acqua si è potuto disporre da un minimo di 9 ad un massimo di 12 documenti. Lo studio delle variazioni altimetriche si è basato invece sul confronto di sezioni topografiche e sul rilevamento sul terreno.

Gli alvei, che hanno evidenziato delle tendenze evolutive molto simili fra loro, sono risultati complessivamente stabili nel corso del XIX sec., mentre soggetti a significative modificazioni nel periodo seguente. Per buona parte del XX sec., fino agli anni '80/'90, il restringimento e l'incisione dell'alveo sono stati i processi dominanti: rispetto al valore iniziale (prima metà del XIX sec.) la riduzione della larghezza è stata del 50-70 %, mentre l'abbassamento del fondo è stato mediamente dell'ordine di 2-3 m, ma localmente anche di 8-9 m. Negli ultimi 15-20 anni si è verificata, a parte il caso del Torre, un'inversione di tendenza: i processi più diffusi sono stati infatti l'allargamento e la sedimentazione. Quest'ultima fase di evoluzione degli alvei ha solo in parte compensato le modificazioni del periodo precedente.

Il prelievo dei sedimenti e le opere di difesa hanno avuto un ruolo determinante, in particolare nella fase di principale modificazione degli alvei (dagli anni '50 agli anni '80/'90). Di minor impatto, almeno per i tratti d'alveo qui esaminati, risultano essere state le dighe (ad eccezione del Cellina), le sistemazioni idraulico-forestali e la riforestazione. Come evidenziato in studi precedenti, i vari interventi antropici hanno radicalmente alterato il regime del trasporto solido, mentre solo nel caso del Cellina è stata riscontrata una variazione significativa delle portate formative.

ABSTRACT: Surian N. et al., *Channel adjustments of the main rivers of Venetia and Friuli Venezia Giulia over the last 200 years* (IT ISSN 0394-3356, 2008).

*The streams of the Veneto and Friuli Venezia Giulia Regions, as many other Italian streams, have undergone remarkable channel adjustments in the last decades, which have been induced by a range of human interventions. The paper, which reports the state of the art about five streams (Brenta River, Piave River, Cellina Torrent, Tagliamento River and Torre Torrent), aims to compare the evolutionary trends of such streams and the factors that have driven to channel changes in the medium and short periods (last 200 years). The selected streams are relatively large (their drainage basins range between 446 km<sup>2</sup> and 3899 km<sup>2</sup>) and have very wide gravel channels, often with a braided morphology, in the study reaches. Planform changes, in particular channel width variations, have been analysed using maps and aerial photographs (9 to 12 different maps/photos were available for each stream). Bed-level changes have been investigated through cross-section comparisons and field surveys.*

*The river channels have shown very similar evolutionary trends and magnitude of adjustments. Channel changes were not notable over the 19<sup>th</sup> century, whereas the channels have been in an unstable condition in the following period. Narrowing and incision have been the dominant processes during the 20<sup>th</sup> century, up to the 1980s-1990s. Channel width reduction has been of 50-70 %, referring to the width in the first half of the 19<sup>th</sup> century, and bed-level lowering of 2-3 m on average, but locally up to 8-9 m. A different evolutionary trend, except for the Torre Torrent, has occurred in the last 15-20 years, since channel widening and aggradation have been the most common processes. The magnitude of changes during the last phase has been generally much smaller in comparison with those of the previous phases of adjustment.*

*The gravel mining and channelization works have been the main causes of channel changes, in particular as for the main phase of adjustment that took place from the 1950s to the 1980s/1990s. The dams (except for the Cellina Torrent), torrent control works, and reforestation have probably had a smaller effect on channel dynamics than mining and channelization. As pointed out in previous studies, it is confirmed that human interventions have dramatically altered the sediment regime, whereas a significant change of channel-forming discharges has been documented in just one case (Cellina)*

Parole chiave: Alvei ghiaiosi, variazioni morfologiche, impatto antropico, Italia Nord-Orientale.

Keywords: Gravel-bed rivers, channel adjustments, human impact, North-Eastern Italy.

### 1. INTRODUZIONE

L'instabilità degli alvei indotta da interventi antropici e le conseguenti modificazioni morfologiche sono da numerosi anni un importante tema di ricerca nell'ambito della geomorfologia fluviale (LEOPOLD, 1973; PETTS, 1979; WILLIAMS & WOLMAN, 1984; WYZGA, 1993; LIEBAULT & PIEGAY, 2001). Come evidenziato recentemente da DOWNS & GREGORY (2004) e da HABERSACK &

PIEGAY (2008) tali ricerche hanno, fra l'altro, rilevanti ricadute pratiche in quanto la conoscenza dell'evoluzione recente degli alvei è fondamentale nell'ambito della pianificazione, gestione e riqualificazione dei corsi d'acqua. Questi aspetti risultano di particolare interesse nel contesto italiano, in quanto la maggior parte dei sistemi fluviali sono stati fortemente alterati da molteplici interventi antropici (prelievo di sedimenti, dighe, opere di canalizzazione, sistemazioni idraulico-forestali) con l'ef-

fetto di considerevoli modificazioni nella morfologia e dinamica degli alvei (SURIAN & RINALDI, 2003).

I principali corsi d'acqua veneto-friulani sono stati soggetti negli ultimi decenni a profonde modificazioni morfologiche, indicative di una condizione d'instabilità, ossia di un'alterazione dei fattori che controllano la dinamica di un corso d'acqua (nel caso specifico, del regime delle portate solide). Tali modificazioni, che hanno rilevanti effetti sulla stabilità delle opere in alveo, sulle acque sotterranee, sulla propagazione delle piene e sull'ecologia dell'ambiente fluviale e ripariale (BRAVARD *et al.*, 1999), sono state analizzate già a partire dalla fine degli anni '70 del secolo scorso (CASTIGLIONI & PELLEGRI, 1981), ma solo negli anni più recenti sono state oggetto di un significativo numero di studi (SURIAN, 1999, 2003; 2006; SURIAN *et al.*, 2005; SURIAN & CISOTTO, 2007; DA CANAL *et al.*, 2007; SURIAN *et al.*, 2007). Ciò che è emerso dagli studi finora svolti, che generalmente si riferiscono a singoli corsi d'acqua, è una rapida evoluzione degli alvei contraddistinta da processi di restringimento ed incisione. In particolare per quanto riguarda la larghezza degli alvei è stata osservata una intensa fase di restringimento, iniziata negli anni '50 del XX sec., a cui è seguita generalmente una fase di allargamento (SURIAN & CISOTTO, 2007; DA CANAL *et al.*, 2007). Queste variazioni di larghezza sono generalmente associate ad un'incisione, nella fase di restringimento, e ad una aggradazione dell'alveo, nella fase di allargamento. Va sottolineato che il binomio "allargamento/aggradazione", frequente nella fase più recente (ultimi 15-20 anni), non può comunque essere considerato una regola dei casi esaminati (SURIAN & CISOTTO, 2007). Questi aggiustamenti degli alvei, che in molti tratti hanno anche comportato una sostanziale modificazione della morfologia, con trasformazione dell'alveo da braided a canale singolo, sono imputabili essenzialmente ad una serie di interventi antropici. Il prelievo di sedimenti e la costruzione di opere di difesa in alveo hanno avuto un ruolo determinante in molti corsi d'acqua, ma in alcuni casi altri interventi (ad esempio la costruzione di dighe) hanno contribuito ad alterare la dinamica fluviale.

Il presente lavoro si basa sulle ricerche svolte negli ultimi anni, in particolare nell'ambito di un progetto nazionale (PRIN 2005 - "Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali in Italia centro-settentrionale: tendenze evolutive, cause ed implicazioni applicative"). Le analisi si sono basate su metodi ormai consolidati in quest'ambito di ricerca (analisi della cartografia storica e delle foto aeree tramite GIS, confronto di rilievi topografici, rilievo geomorfologico dell'alveo). Le ricerche hanno consentito da una parte di affinare le conoscenze rela-

tivamente ad alcuni corsi d'acqua che già in precedenza erano stati oggetto di studio (Brenta, Piave e Tagliamento), ma anche di considerare altri corsi d'acqua (Cellina e Torre), al fine di disporre di una casistica più ampia per la regione in esame. Obiettivo del lavoro è quindi quello di presentare lo stato attuale delle conoscenze su cinque dei principali corsi d'acqua veneto-friulani, ma soprattutto quello di confrontare le tendenze evolutive ed i fattori che hanno determinato la dinamica degli alvei negli ultimi 200 anni. Tale confronto ha lo scopo di fornire un contributo nella definizione di un modello di evoluzione degli alvei italiani (SURIAN & RINALDI, 2003 e 2004), nell'individuazione più precisa delle cause che hanno determinato le modificazioni degli alvei e nella comprensione degli aggiustamenti morfologici più recenti (ultimi 15-20 anni).

## 2. INQUADRAMENTO DEI CORSI D'ACQUA ANALIZZATI

I corsi d'acqua esaminati (Fiume Brenta, Fiume Piave, Torrente Cellina, Fiume Tagliamento e Torrente Torre) hanno origine nelle Alpi orientali e sfociano nel Mar Adriatico a nord della Laguna di Venezia (ad eccezione del Fiume Brenta che sfocia a sud) (Fig. 1). I relativi bacini idrografici hanno dimensioni variabili tra 446 km<sup>2</sup> (Cellina) e 3899 km<sup>2</sup> (Piave): quelli di minore dimensione (Cellina e Torre) si sviluppano nella regione prealpina, mentre quelli più estesi (Brenta, Piave e Tagliamento) comprendono anche la regione alpina in senso stretto. Le rocce più diffuse in questi bacini sono quelle sedimentarie e, fra queste, calcari e dolomie. L'energia del rilievo, valutata come differenza fra la

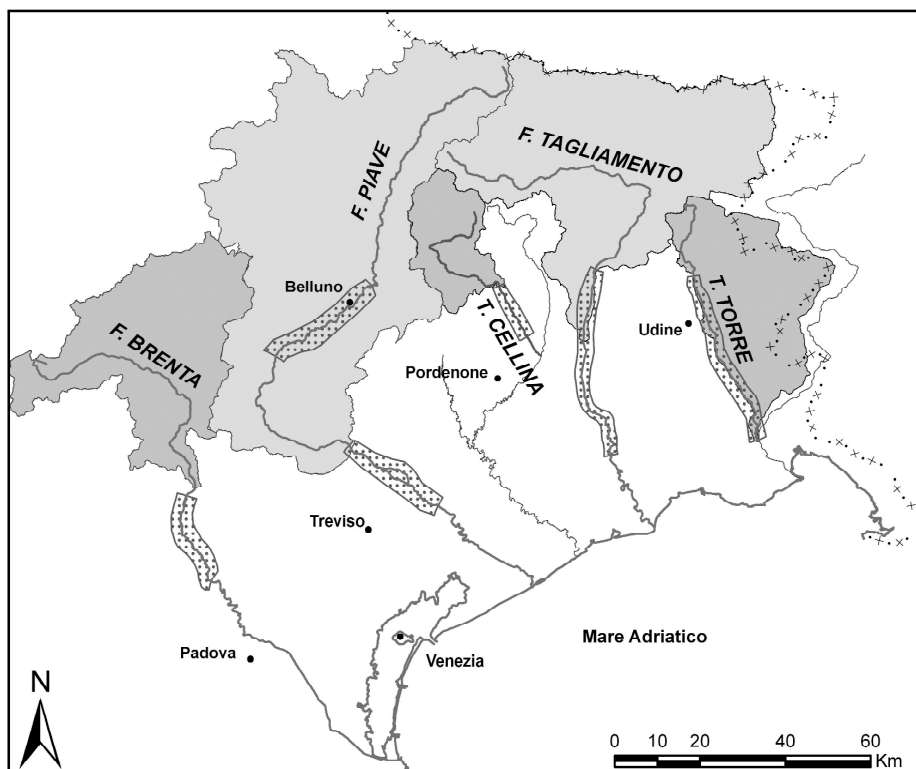


Fig. 1 - Inquadramento geografico dei corsi d'acqua analizzati, con evidenziati i tratti di studio.  
General setting of the selected streams, showing the study reaches.

quota più alta e la quota più bassa (sezione di chiusura) nel bacino, varia tra 1679 m (Torre) e 3162 m (Piave) (Tab. 1).

Le precipitazioni medie annue sono dell'ordine di 1300-1400 mm nei bacini del Piave e del Brenta, mentre decisamente più elevate in quelli del Cellina (1770 mm), del Tagliamento (2150 mm) e del Torre (2280 mm). Questi ultimi tre valori riflettono l'elevata piovosità di questo settore delle Alpi, ma anche il fatto che la fascia prealpina registra precipitazioni maggiori rispetto alle zone più interne della catena. Il regime molto variabile dei deflussi, ulteriormente accentuato negli ultimi decenni da importanti regolazioni (dighe, traverse, ecc.), risulta evidente dall'analisi dei rapporti fra le portate massime di piena e le portate medie annue. Tali rapporti assumono infatti valori elevati, ad esempio pari a 42,6 nel caso del Fiume Tagliamento.

Come si evince dalla Tab. 2, che riporta alcuni dati morfologici, sedimentologici ed idraulici, i tratti esaminati hanno caratteristiche molto simili. La porzione più a monte dei tratti è caratterizzata da una morfologia *braided* o transizionale (*wandering*), mentre le porzioni più a valle generalmente da una morfologia sinuoso/meandriforme (Tab. 2). Si tratta sempre di alvei ghiaiosi, con sponde non coesive, ossia costituite principalmente da ghiaia, nei tratti *braided*/transizionali, e composite, nei tratti sinuoso/meandriformi. La pendenza degli alvei è generalmente compresa tra 0,3 % e 0,6 %, ad eccezione di quella del Cellina che è pari a 1,2 %. Ad eccezione del tratto montano del Piave (Vallone Bellunese), i tratti esaminati hanno come limite superio-

re la chiusura del bacino montano e si estendono nell'alta pianura ed in parte della bassa pianura. Solo il Cellina ed il Torre, che confluiscono rispettivamente nel Meduna (a sua volta affluente del Livenza) e nell'Isonzo, sono stati esaminati nei loro tratti terminali, mentre tali tratti non sono stati considerati nel caso del Brenta, Piave e Tagliamento in quanto diffusamente canalizzati e quindi meno significativi per uno studio degli aggiustamenti dell'alveo. I tratti di studio sono relativamente estesi, da un minimo di 10 km (Cellina) ad un massimo di 49 km (Tagliamento).

### 3. IMPATTO ANTROPICO SUI SISTEMI FLUVIALI

I corsi d'acqua in esame sono stati interessati da numerosi interventi antropici che possono aver condizionato la loro dinamica (Tab. 3). Per alcuni di questi interventi è stato possibile reperire (da fonti bibliografiche, ricerche d'archivio e comunicazioni personali) o ottenere (attraverso l'analisi della cartografia storica e delle foto aeree) dati sufficientemente precisi per quantificarne l'entità e la loro collocazione temporale, mentre per altri interventi sono rimaste delle lacune. Un primo aspetto rilevante è comunque il fatto che le singole tipologie d'intervento (prelievo di sedimenti, costruzione di dighe, costruzione di opere di difesa, ecc.) hanno una collocazione temporale molto simile nei cinque corsi d'acqua in esame (Tab. 3).

Una possibile distinzione è quella fra gli interventi che hanno un'influenza diretta sulla dinamica dell'alveo

Tabella 1 - Caratteristiche idrologiche e fisiografiche dei corsi d'acqua esaminati. Note: (-) dato non disponibile.

*Hydrological and physiographic characteristics of the selected streams. Notes: (-) data not available.*

Corso d'acqua	Area bacino idrografico (km <sup>2</sup> )	Lunghezza (km)	Energia del rilievo del bacino (m)	Precipitazioni medie (mm/anno)	Portata media annua (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Massimo evento di piena (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
Brenta	1567	174	3079	1390	71	2400
Piave	3899	222	3162	1330	132	5300
Cellina	446	58	2401	1770	-	950
Tagliamento	2580	178	2696	2150	109	4650
Torre	1105	69	1679	2280	-	-

Tabella 2 - Caratteristiche morfologiche, sedimentologiche ed idrauliche dei tratti di studio. Note: (-) dato non disponibile.

*Morphological, sedimentological and hydraulic characteristics of the selected reaches. Notes: (-) data not available.*

Corso d'acqua	Lunghezza del tratto di studio (km)	Configurazione dell'alveo (B: braided; T: transizionale; S: sinuoso-meandriforme)	Pendenza alveo (in %)	D <sub>50</sub> sedimenti del fondo (mm)	Tipo di sponde	Q <sub>1,5</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
Brenta	23	B/T/S	0,2-0,5	26-140	Non coesive; Composite	390
Piave (tratto montano)	32	B/T	0,3-0,6	20-48	Non coesive	510
Piave (tratto pianura)	22	B/T/S	0,2-0,5	18-28	Non coesive; Composite	700-750
Cellina	10	B/T	1,2	-	Non coesive	105
Tagliamento	49	B/T/S	0,1-0,4	20-49	Non coesive; Composite	900-1000
Torre	44	B/T/S	0,3-0,6	-	Non coesive; Composite	-

Tabella 3 - Interventi antropici nei corsi d'acqua esaminati. Nota: per anni '50, '60, ecc., si intende del XX sec.

*Human interventions in the selected streams. Note: "anni '50, '60, etc." refers to the 20<sup>th</sup> century.*

Corso d'acqua	Intenso prelievo di sedimenti in alveo	Costruzione di argini ed altre opere di difesa in alveo	Realizzazione delle dighe	Area del bacino a monte delle dighe (%)
Brenta	Anni '50-'80	XIX-XX sec.	1954	40
Piave	Anni '60-'80	XV-XX sec.	Anni '30-'50	54
Cellina	Anni '70-'80	XIX-XX sec.	1954	87
Tagliamento	Anni '70-'80	XIX-XX sec.	Anni '50	3
Torre	Anni '60-'70	XIX-XX sec.	-	-

e quelli che agendo a scala di bacino, ad esempio sugli affluenti o sui versanti, hanno un'influenza indiretta, ma talvolta ugualmente rilevante, sulla dinamica di un determinato corso d'acqua. Fra gli interventi "diretti" i più rilevanti sono senz'altro la costruzione delle opere di difesa ed il prelievo di sedimenti. Opere di difesa sono state realizzate in tutti i tratti esaminati, generalmente a partire dal XIX sec. Inizialmente si è trattato soprattutto di opere longitudinali (argini), mentre nel corso del XX sec. sono state realizzate anche numerose strutture trasversali (pennelli). Il prelievo di sedimenti in alveo è stato invece un fenomeno meno distribuito nel tempo (Tab. 3): un prelievo molto intenso, soprattutto legato ad un forte sviluppo economico, ha avuto luogo tra gli anni '50 e gli anni '80 del XX sec. Seppure con qualche piccola differenza l'attività di prelievo si è concentrata in un periodo relativamente breve (20-25 anni): ad esempio dagli anni '50 ai primi anni '80 nel Brenta, mentre dai primi anni '70 ai primi anni '90 nel Tagliamento. I volumi di sedimenti rimossi dagli alvei sono stati dell'ordine di vari milioni di m<sup>3</sup>. Facendo riferimento ai dati ufficiali, che sono certamente una sotto-stima dei valori reali, sono stati valutati i seguenti volumi: 8,6 milioni di m<sup>3</sup>, per il Brenta tra il 1953 ed il 1977 (SURIAN & CISOTTO, 2007); 24 milioni di m<sup>3</sup>, per il Tagliamento tra il 1970 ed il 1991 (SURIAN, 2006); 15 milioni di m<sup>3</sup>, per il Torre fra gli anni '50 e gli anni '70 (SURIAN *et al.*, 2007). Si tratta di volumi considerevoli se si considera che il trasporto solido totale nel Tagliamento, probabilmente il corso d'acqua con trasporto più elevato fra quelli esaminati, è stato stimato pari 1,3 milioni di m<sup>3</sup> (AUTORITÀ DI BACINO, 1998), ma soprattutto se si considera che i sedimenti ghiaiosi asportati corrispondono al trasporto solido al fondo, e quindi solo ad un 10-20 % (SURIAN & CISOTTO, 2007) del trasporto totale. Negli ultimi 20-25 anni il prelievo non si è esaurito, ma assestato su volumi di sedimenti decisamente inferiori a quelli dei decenni precedenti.

Gli interventi "indiretti" includono la costruzione di dighe, le sistemazioni idraulico-forestali nel bacino montano e il rimboschimento dei versanti (Tab. 3). La maggior parte delle dighe sono state costruite negli anni '50 del XX sec., anche se alcuni sbarramenti, generalmente di minori dimensioni, erano già stati realizzati nella prima metà del secolo (ad esempio nei bacini del Brenta, Piave e Cellina). Gli effetti delle dighe sui tratti d'alveo esaminati sono differenti in relazione innanzitutto alla distanza fra lo sbarramento ed il tratto stesso (WILLIAMS & WOLMAN, 1984), inoltre all'area a monte dello sbarramento (percentuale del bacino idrografico sottesa dalla diga). Il Tagliamento ed il Cellina

risultano in tal senso due casi estremi: nel primo caso l'area sottesa dalle dighe è decisamente modesta (3%) rispetto all'intero bacino idrografico e non prossima al tratto di studio, mentre nel Cellina la diga sottende una considerevole porzione del bacino (87 %) ed è situata 6 km a monte del tratto esaminato. Per le sistemazioni idraulico-forestali nei bacini montani non si dispone attualmente di un'accurata documentazione, ma si tratta in ogni caso di una tipologia d'intervento che, in maniera più o meno diffusa, ha interessato tutti i corsi d'acqua in esame, soprattutto nel corso del XX sec. Infine per quanto riguarda la copertura forestale è associato un processo di espansione nelle regioni in esame (Veneto e Friuli Venezia Giulia), così come a scala nazionale. Il processo, iniziato da alcuni decenni e tuttora in atto, è stato quantificato solo per piccole aree (LAMEDICA *et al.*, 2007), per cui risulta difficile valutarne l'effetto alla scala dei bacini idrografici qui esaminati. Comunque che per alcuni bacini, ad esempio quello del Piave, il processo di riforestazione dovrebbe essere cominciato già dai primi decenni del XX sec. (VOLLO, 1942; AGNOLETTI, 1993).

L'aspetto rilevante che emerge dall'analisi dei principali interventi antropici è che tutti hanno o possono aver influito sul regime del trasporto solido dei corsi d'acqua. In particolare, seppure con intensità e tempi differenti, il prelievo di sedimenti, la costruzione delle dighe, le sistemazioni idraulico-forestali e la riforestazione nei bacini montani hanno determinato una riduzione della produzione di sedimenti a scala di bacino e del trasporto solido in alveo. Generalmente invece la regolazione dei deflussi non ha avuto effetti significativi sulle portate formative, ossia sulle portate rilevanti in termini di trasporto solido al fondo e di dinamica degli alvei (SURIAN, 2006; SURIAN & CISOTTO, 2007). Solo nel caso del Cellina è stato riscontrato un effetto in tal senso: a seguito della costruzione della diga di Ponte Antoi (1954) le piene con tempi di ritorno di 1,5 e 5 anni sono diminuite, rispettivamente, da 165 m<sup>3</sup>/s a 105 m<sup>3</sup>/s e da 480 m<sup>3</sup>/s a 260 m<sup>3</sup>/s (MUSSIO, 2007).

#### 4. MATERIALI E METODI

##### 4.1 Cartografia storica e foto aeree

L'impiego della cartografia e delle fotografie aeree ha consentito di analizzare l'evoluzione degli alvei negli ultimi 200 anni. Per quanto riguarda il XIX sec. è stata utilizzata la Carta del Ducato di Venezia (anche nota come Carta del von Zach) del 1805 (scala 1:26.000), la Carta del Regno Lombardo Veneto del 1833 (scala

1:86.400) e le prime edizioni delle Tavole I.G.M. realizzate alla fine del secolo (scala 1:25.000). Per il periodo successivo sono state utilizzate le varie edizioni delle Tavole I.G.M. (prima metà del secolo) e le foto aeree (dagli anni '50 del XX sec. ad oggi) (Tab. 4). In qualche caso sono state anche impiegate le Carte Tecniche Regionali (scala 1:5.000 o 1:10.000) in sostituzione delle foto aeree degli anni '80. Per ognuno dei corsi d'acqua si è quindi potuto disporre complessivamente da un minimo di 9 ad un massimo di 12 documenti (cartografia + foto aeree).

L'analisi delle carte e delle foto aeree, realizzata in ambiente GIS, si è concentrata soprattutto sulla misura della larghezza dell'alveo. Tale parametro può essere valutato sia facendo riferimento all'intera area compresa fra le sponde, sia escludendo le isole, ossia quelle porzioni dell'alveo non attive in termini di trasporto solido al fondo e pertanto assimilabili ad una piana inondabile (SURIAN, 2006). Nei risultati di seguito illustrati la larghezza a cui ci si riferisce è quella dell'"alveo attivo" ("alveo totale" - "isole"). A differenza di precedenti studi (SURIAN, 1999; WINTERBOTTOM, 2000; LIEBAULT & PIEGAY, 2001), nei quali la larghezza è stata stimata come media di una serie di misure puntuali, ossia in corrispondenza di sezioni trasversali con una determinata equidistanza, la larghezza media di un tratto è stata valutata dal rapporto "area alveo"/"lunghezza tratto". In tal modo si è eliminata una possibile fonte di errore che derivava inevitabilmente dalla stima della larghezza media a partire da un numero discreto di misure. L'errore associato alle misure di larghezza deriva dalla fase di georeferenziazione delle immagini (cartografia e foto aeree) e dalla successiva fase di individuazione e digitalizzazione delle sponde dell'alveo. Sulla base di una serie di analisi preliminari e di quanto riscontrato in precedenti ricerche (GURNELL, 1997; HUGHES *et al.*, 2006) si è valutato che le misure eseguite sui documenti cartografici possono essere affette da errori massimi di 15-20 m, mentre quelle su foto aeree da errori massimi di 5-6 m. Questi valori, seppure indicativi, consentono di valutare il significato delle variazioni di larghezza che sono state osservate.

#### 4.2 Rilievi topografici

Il numero limitato di rilievi topografici disponibili non ha consentito una ricostruzione dettagliata delle variazioni altimetriche così come è stato invece possibile per le variazioni di larghezza dell'alveo. Da un punto di vista temporale, solo per il Piave e per il Brenta i primi rilievi si riferiscono ai primi decenni del XX sec.

(rispettivamente 1929 e 1932), mentre per il Tagliamento e il Torre risalgono agli anni '70 (rispettivamente 1970 e 1979) (Tab. 4). In pratica, il numero di rilievi disponibili ha consentito delle ricostruzioni temporali di un certo significato solo nel caso del Brenta e del Tagliamento. I rilievi sono stati comunque di indubbia importanza per stimare l'entità delle variazioni avvenute, seppure limitate al periodo più recente di quello complessivo considerato nel presente studio.

#### 4.3 Rilevamento geomorfologico dell'alveo

Il rilievo geomorfologico sul terreno è stato finalizzato da un lato ad una caratterizzazione complessiva dell'alveo (caratteristiche morfologiche, sedimentarie e idrauliche, vegetazione, opere antropiche), dall'altro alla valutazione delle tendenze evolutive, nel medio e breve termine, dell'alveo. Tale rilievo è stato svolto in modo sistematico, utilizzando le schede messe a punto nell'ambito del progetto di ricerca citato in precedenza (RINALDI, 2008), sul Piave e, solo parzialmente, sul Tagliamento. L'obiettivo principale dei rilievi è stato quello di acquisire informazioni sull'evoluzione altimetrica, sia attraverso la misura di dislivelli tra superfici omologhe che il riconoscimento di una serie di evidenze morfologiche e sedimentologiche.

### 5. RISULTATI

#### 5.1 Variazioni di larghezza degli alvei

L'analisi della cartografia storica e delle foto aeree tramite GIS ha permesso di ricostruire le variazioni di larghezza degli alvei negli ultimi 200 anni. I risultati di tale analisi sono riportati in Fig. 2 e nelle Tab. 5 e 6. Si può innanzitutto osservare che alcuni dei tratti di studio sono stati suddivisi a loro volta in sotto-tratti in quanto o molto estesi (es. Tagliamento) o non del tutto omogenei nella loro evoluzione (es. Brenta) (Fig. 2). Per un confronto più immediato tra i diversi corsi d'acqua si è ritenuto opportuno esprimere la larghezza in termini adimensionali piuttosto che in termini assoluti. Pertanto nei grafici di Fig. 2 la larghezza è espressa come " $L/L_{max}$ ", dove L rappresenta la larghezza misurata nei diversi anni e  $L_{max}$  la larghezza massima osservata nel periodo in esame.

Un primo aspetto che si può rilevare è la forte analogia di comportamento dei diversi tratti esaminati. Nel complesso i tratti mostrano infatti un marcato restringimento dell'alveo e solo a partire dagli anni '80-

Tabella 4 - Numero di documenti cartografici, di foto aeree e rilievi topografici utilizzati nel presente studio e relativi intervalli di tempo. *Number of maps, aerial photographs and topographic surveys that have been used and periods of time covered by such data.*

Corso d'acqua	Numero di documenti cartografici utilizzati	Numero di rilievi aerei utilizzati	Numero di rilievi topografici utilizzati
Brenta	4 (1805-1960)	5 (1955-2003)	7 (1932-1997)
Piave (tratto montano)	3 (1805-1926)	6 (1960-2003)	2 (1929-2003)
Piave (tratto pianura)	5 (1805-1982)	4 (1991-2003)	4 (1929-2002)
Cellina	7 (1805-1986)	3 (1997-2002)	-
Tagliamento	4 (1805-1927)	8 (1954-2007)	5 (1970-2003)
Torre	7 (1805-1989)	2 (1999-2004)	2 (1979-2003)

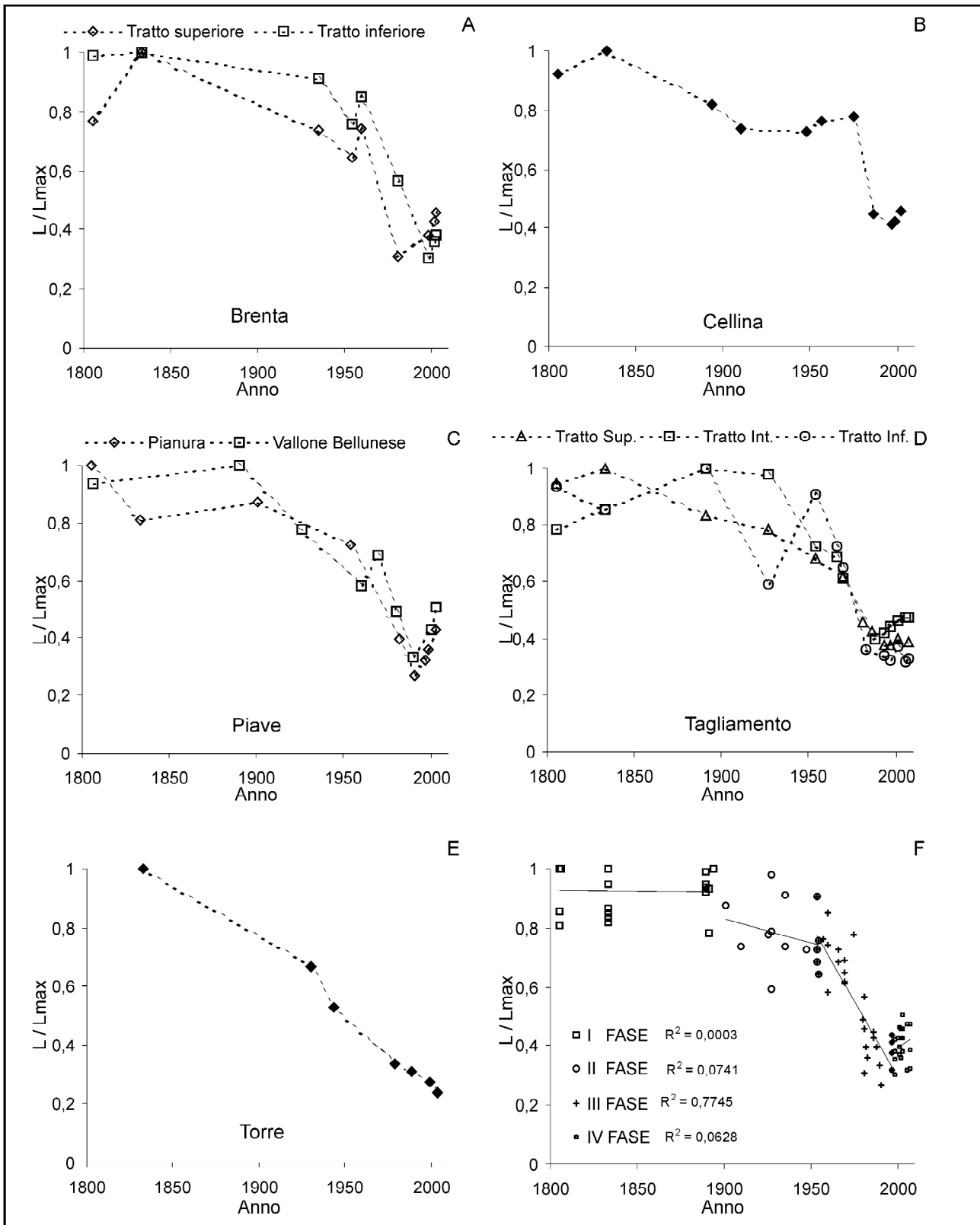


Fig. 2 - Variazione della larghezza dell'alveo durante gli ultimi 200 anni nei cinque corsi d'acqua in esame (A-E); la larghezza è espressa come " $L/L_{max}$ ", dove  $L$  rappresenta la larghezza misurata nei diversi anni e  $L_{max}$  la larghezza massima nel periodo in considerazione. Un'analisi complessiva dei cinque corsi d'acqua e dei relativi sotto-tratti è riportata nell'ultimo grafico (F), nel quale sono indicati anche i parametri statistici delle regressioni ottenute per ciascuna fase di evoluzione.

*Changes in channel width during the last 200 years in the selected streams (A-E); the width is represented by the ratio " $L/L_{max}$ ", where  $L$  is the width measured in the different years and  $L_{max}$  the maximum width in the study period. An overall analysis of the selected streams is shown in the last graph (F), which reports the statistics of the linear regressions for each evolutionary phase.*

'90 un processo di allargamento (Fig. 2). Nonostante qualche tratto si discosti in parte da tale evoluzione, si è ritenuta significativa un'analisi statistica dell'insieme dei dati, ossia di tutti i tratti e sotto-tratti, al fine di individuare le fasi aggiustamento verificatesi negli ultimi 200 anni (Fig. 2F). L'analisi ha evidenziato la presenza di quattro fasi principali: i) una prima fase, corrispondente al XIX sec., caratterizzata da una sostanziale stabilità della larghezza; ii) una seconda fase (prima metà del XX sec.) nella quale si verifica una modesta riduzione della larghezza; iii) una terza fase (anni '50 - anni '80/'90) interessata da un marcato processo di restringimento dell'alveo; iv) infine una quarta fase (ultimi 15-20 anni) nella quale prevale un processo di allargamento dell'alveo. Un esame più specifico di queste fasi di aggiustamento dell'alveo viene di seguito riportato.

La condizione di massimo restringimento si è quindi verificata generalmente negli anni '80/'90 del XX sec., quando la riduzione della larghezza è stata dell'ordine del 50-70 % rispetto al valore iniziale (prima metà del XIX sec.) (Tab. 5). Il minimo restringimento è stato riscontrato per il tratto intermedio del Tagliamento, da 980 m a 500 m (pari al 49 %), mentre i valori massimi per il tratto di pianura del Piave e per il Torre, rispettivamente da 960 m a 260 m e da 560 m a 150 m (entrambi pari al 73 %). Passando ad un esame delle fasi che hanno portato a questa situazione di massimo restringimento degli alvei si rileva una prima fase, corrispondente all'intero XIX sec., nella quale dei 9 tratti in esame, 5 sono stati interessati da restringimento, variabile tra il 4 % ed 20 %, e 4 da allargamento, variabile tra il 6 % ed il 22 % (Tab. 5). Nel complesso si può quindi osservare l'assenza di un restringimento generalizzato degli alvei e variazioni comunque contenute, sia nel caso di restringimento che di allargamento dell'alveo. Nella seconda fase (prima metà del XX sec.) si riscontra già

un restringimento generalizzato: in 8 tratti si ha una riduzione della larghezza, con valori compresi tra il 9 % (tratto inferiore del Tagliamento) e il 42 % (Piave nel Vallone Bellunese), mentre solo l'alveo del Cellina risulta sostanzialmente stabile (allargamento del 3 %). Il restringimento più consistente si verifica nella terza fase (anni '50 - anni '80/'90) nella quale tutti i tratti subiscono una riduzione della larghezza dell'alveo, variabile tra il 25 % ed il 59 %. L'entità del restringimento di questa terza fase è ben espresso non solo dai valori percentuali rispetto alle larghezze originarie, ma anche dai tassi di restringimento. In questa fase il tasso di restringimento è infatti in media di 8 m/anno (con variazioni tra 2,5 e 15,5 m/anno), a differenza della fase precedente nella quale era in media di 2,5 m/anno (con variazioni tra 0,6 e 5,4 m/anno).

Negli ultimi anni del periodo esaminato tutti i corsi d'acqua, ad eccezione del Torre, mostrano un'inversione di tendenza, ossia un netto processo di allargamento o, quantomeno, un'interruzione del processo di restringimento (Tab. 6). In alcuni casi questa nuova fase ha inizio già negli anni '80, ad esempio nel tratto superiore del Brenta e nel tratto intermedio del Tagliamento, ma nella maggior parte dei casi sembra avere inizio negli anni '90. Naturalmente rimangono delle incertezze nella definizione temporale di questa inversione di tendenza, incertezze che potrebbero essere risolte solo in quei casi dove ulteriori foto aeree si rendessero disponibili. In termini sia assoluti (allargamento massimo di 153 m del Piave in pianura) che percentuali (aumento della larghezza del 20 % del Brenta nel tratto superiore) questa fase è decisamente meno rilevante di quella precedente. Ma analizzando i tassi, e quindi tenendo conto della durata minore di questa fase, si può osservare che l'intensità dell'allargamento è comunque significativa. Il tasso medio di allargamento dei 7 tratti

Tabella 5 - Variazioni di larghezza nel corso delle prime tre fasi (per l'individuazione delle fasi si veda sia la Fig. 2 sia il testo); per ogni fase la variazione è espressa in termini assoluti (m), in percentuale (%), considerando come valore di riferimento la larghezza all'inizio del XIX sec., e come tasso di variazione medio (m/anno).

*Width changes during the first three phases of channel adjustments (for definition of the different phases see Fig. 2 and the main text); for each phase width changes are reported in metres (m), in percent (%), taking the width at the beginning of the 19<sup>th</sup> century as reference, and as average rate of change (m/year).*

Corso d'acqua		I Fase (XIX sec.)			II Fase (prima metà XX sec.)			III Fase (anni '50 - anni '80/'90)			Variazione totale nelle 3 fasi	
		(m)	%	(m/anno)	(m)	%	(m/anno)	(m)	%	(m/anno)	(m)	%
Brenta	tratto superiore	49	11%	0,6	-123	-27%	-1,9	-200	-44%	-7,7	-275	-60%
	tratto inferiore	-16	-4%	-0,2	-83	-20%	-1,3	-193	-46%	-4,4	-292	-69%
Piave	Vallone Bellun.	40	6%	0,5	-272	-42%	-3,9	-160	-25%	-5,3	-392	-64%
	Pianura	-130	-14%	-1,5	-132	-14%	-2,1	-437	-46%	-11,8	-699	-73%
Cellina		-89	-11%	-1,0	25	3%	0,5	-310	-38%	-7,8	-374	-55%
Tagliamento	tratto superiore	-224	-11%	-2,6	-295	-15%	-4,7	-606	-31%	-15,5	-1.125	-60%
	tratto intermed.	273	22%	3,2	-341	-27%	-5,4	-415	-33%	-12,2	-483	-49%
	tratto inferiore	29	7%	0,3	-41	-9%	-0,6	-264	-59%	-5,1	-275	-66%
Torre		-110	-20%	-1,9	-157	-28%	-3,0	-142	-25%	-2,5	-409	-73%

(escludendo il Torre ed il tratto inferiore del Tagliamento) risulta infatti pari a 6,7 m/anno, mentre il tasso più elevato è quello del Piave in pianura, pari a 12,7 m/anno. Infine, oltre a ricordare che il Torre si contraddistingue come unico corso d'acqua che continua a

restringersi nella fase più recente, si fa notare come il Tagliamento, a differenza del Brenta e del Piave, mostri un significativo allargamento solo nel tratto intermedio, mentre una sostanziale stabilità della larghezza negli altri due tratti (Fig. 2 e Tab. 6).

Tabella 6 - Variazioni di larghezza nella quarta fase (per l'individuazione delle fasi si veda sia la Fig. 2 sia il testo); la variazione è espressa in termini assoluti (m), come tasso di variazione medio (m/anno), ed in percentuale (%), considerando come valore di riferimento sia la larghezza all'inizio del XIX sec. sia la larghezza all'inizio della fase. Si osservi che la fase ha estensione differente da tratto a tratto sia perché l'inversione di tendenza da restringimento ad allargamento non è stata contemporanea, sia per una disomogenea disponibilità delle foto aeree. Il Torre fa caso a sé, in quanto non si è verificata un'inversione di tendenza. Note: "n.v." indica nessuna variazione, ossia una variazione di larghezza inferiore all'errore associato alla misura.

*Width changes in the fourth phase of adjustment (for definition of the different phases also see Fig. 2 and the main text); width changes are reported in metres (m), as average rate of change (m/year), and in percent (%), taking both the width at the beginning of the 19<sup>th</sup> century and the width at the beginning of the phase itself as references. It is worth noting that the period of this phase is different from one reach to another, since widening has started at different times and air photos are not available with same details in the selected reaches. The case of the Torre is completely different, since narrowing is still ongoing. Notes: "n.v" means no change, since the width change is lower than measurement error.*

Corso d'acqua		Periodo	(m/anno)	IV Fase (m)	% (1805)	% (inizio fase)
Brenta	tratto superiore	1981 - 2003	4,1	90	20%	49%
	tratto inferiore	1999 - 2003	8,0	32	8%	25%
Cellina		1997 - 2002	7,8	39	5%	11%
Piave	Vallone Bellunese	1990 - 2003	8,5	111	17%	51%
	Pianura	1991 - 2003	12,7	153	16%	59%
Tagliamento	tratto superiore	1993 - 2007	1,9	26	1%	3%
	tratto intermedio	1988 - 2007	4,2	80	6%	16%
	tratto inferiore	1997 - 2007	-	n.v.	-	-
Torre		1999 - 2004	-4,3	-22	-4%	-14%

Tabella 7 - Variazioni altimetriche degli alvei desunte dal confronto di sezioni topografiche (ST) e da rilevamenti geomorfologici (RG) svolti nel 2007; per ogni tratto è indicato il valore medio ("-" indica incisione, "+" sedimentazione) e tra parentesi i valori minimi e massimi. La prima fase corrisponde sostanzialmente alla terza fase e ad una parte della seconda fase definite per le variazioni di larghezza (Tab. 5), mentre la seconda fase alla quarta fase definita per le variazioni di larghezza (Tab. 6). I dati non sono attualmente disponibili per il Cellina.

*Bed-level changes from comparison of topographic surveys (ST) and geomorphological surveys carried out in 2007 (RG); the average change ("-" means incision, "+" means aggradation) and the minimum and maximum changes (between brackets) are reported for each reach. The first phase corresponds approximately to the third phase and to part of the second phase that were defined for channel width changes, while the second phase corresponds to the fourth phase defined for width changes. Data is not available for the Cellina Torrent.*

Corso d'acqua		Valore/stima	Prima fase Metodo	Periodo	Seconda fase Valore/stima	Metodo	Periodo
Brenta	tratto super.	-3 m (-5 ÷ 0 m)	ST	1932-1984	+0,2 m (-0,3 ÷ +0,6m)	ST	1984-1997
	tratto infer.	-6 m (-8,5 m ÷ -4 m)	ST	1932-1984	Sedimentazione	ST	1984-1997
Piave	Vallone Bell.se	(-2 ÷ -1 m)	RG		Sedimentazione	RG	
	Pianura	-2 m (-3 ÷ -1 m)	ST + RG	1929-1978	Equilibrio/ Sedimentazione	RG	
Tagliamento	tratto infer.	-1,6 m (-3,9 ÷ 0,4 m)	ST	1970 - 1988	0	ST	1988 - 2003
		-2,9 m (-3,6 ÷ -2,4 m)	RG		0,1 m (-0,6 ÷ 0,9 m)	RG	
	tratto interm.	-0,5 m (-1,5 ÷ 1,2 m)	ST	1970 - 1988	-0,9 m	ST	1988 - 2003
		-1,7 m (-2,5 ÷ -1,2 m)	RG		-0,2 m (-0,5 ÷ 0,2 m)	RG	
tratto super.	-	-	-	-0,4 m (0,7 ÷ -1,7 m)	ST	1988 - 2001	
Torre		-2 m (-5,0 m ÷ 0 m)		pre-1979	-0,8 m (-3 m ÷ +2,6 m)	ST	1979 - 2003



### 5.2 Variazioni altimetriche degli alvei

Inizialmente, in concomitanza con la seconda (prima metà del XX sec.) e, soprattutto, con la terza fase (anni '50 - anni '80/'90) di variazione della larghezza dell'alveo, tutti i corsi d'acqua in esame sono stati soggetti ad un processo di abbassamento del fondo (incisione) (Fig. 3 e Tab. 7). L'incisione è stata più contenuta nei tratti più a monte, generalmente tra i 1 e 3 m, mentre è stata di notevole entità in alcuni tratti inferiori (ad esempio il Brenta dove l'incisione è stata di 8,5 m). Due esempi di variazione spaziale di questo processo d'incisione sono illustrati in Fig. 3. Nel caso del Tagliamento si può notare chiaramente come il tratto inferiore, dove la morfologia dell'alveo è sinuoso-mean-driforme, ha subito un'incisione maggiore rispetto al

tratto più a monte caratterizzato da morfologia *braided*. Nel Piave (tratto montano nel Vallone Bellunese) si osserva invece un'alternanza di tratti con differente grado d'incisione: tale distribuzione spaziale dell'incisione è determinata, almeno in parte, dalla morfologia del fondovalle, ossia dalla presenza di tratti a diverso grado di confinamento. Come esposto nel capitolo precedente, i dati a disposizione non consentono nella maggior parte dei casi una dettagliata ricostruzione dell'evoluzione altimetrica del fondo. Sulla base delle sezioni topografiche e dei rilievi geomorfologici effettuati è comunque ipotizzabile che gran parte del processo d'incisione si sia verificato soprattutto tra gli anni '50 e gli anni '80 del XX sec.

Negli ultimi 15-20 anni, le variazioni altimetriche del fondo sono generalmente in netta discontinuità con il periodo precedente (Fig. 3).

Ad eccezione del Torre, dove è continuato un processo d'incisione, il confronto dei rilievi topografici più recenti ed i rilievi geomorfologici hanno evidenziato che molti tratti sono attualmente in sedimentazione o, perlomeno, in equilibrio (Figg. 3 e 4 e Tab. 7). La sedimentazione, per quanto abbastanza problematica nella stima, è stata al massimo di 2 m. Le evidenze morfologiche e sedimentologiche che hanno permesso di definire l'esistenza di un processo di sedimentazione in alveo sono state le seguenti: la presenza di barre più alte della piana inondabile (quota della sommità delle barre maggiore della quota delle ghiaie sulle sponde); la diffusa presenza di lobi di sedimentazione (Fig. 4); sedimenti del fondo caratterizzati da corazzamento ed embriatura lievi o assenti; forme di fondo scarse o assenti. Un aspetto interessante, si veda ad esempio il Piave in Fig. 3, è la variazione spaziale della sedimentazione che generalmente aumenta da monte verso valle all'interno dei tratti esaminati. Situazione analoga è stata riscontrata lungo il Brenta (SURIAN & CISOTTO, 2007).

Quindi, in generale, i corsi d'acqua veneto-friulani sono stati caratterizzati inizialmente da una fase d'incisione, a cui è seguita una fase di sedimentazione o, comunque, di maggiore stabilità altimetrica. Attualmente gli alvei, nella maggior parte dei tratti esaminati, risultano incisi in quanto la fase d'incisione è stata più prolungata e, generalmente, più intensa di quella di

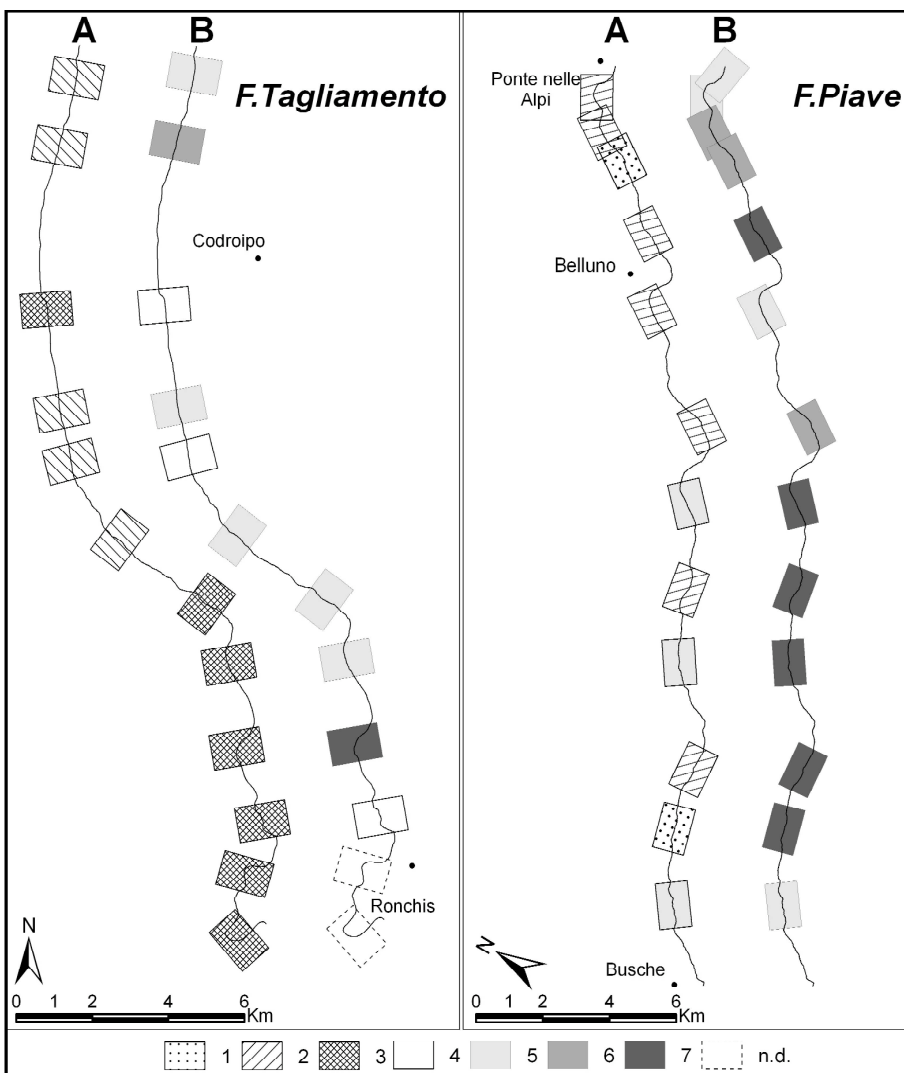


Fig. 3 - Variazioni altimetriche del fondo nel medio (A) e nel breve termine (B) desunte dal rilevamento geomorfologico: il tratto intermedio ed inferiore del Tagliamento è stato analizzato in 12 sotto-tratti, mentre quello del Piave nel Vallone Bellunese in 13 sotto-tratti. Legenda: 1: incisione limitata; 2: incisione moderata; 3: incisione intensa; 4: equilibrio/incisione; 5: equilibrio; 6: equilibrio/sedimentazione; 7: sedimentazione; n.d.: dato non disponibile.

*Bed-level changes in the medium (A) and short (B) periods derived from the geomorphological survey: the medium and lower reaches of the Tagliamento were investigated in 12 sub-reaches, whereas the reach of the Piave in the Vallone Bellunese in 13 sub-reaches. Legend: 1: incision; 2: moderate incision; 3: intense incision; 4: equilibrium/incision; 5: equilibrium; 6: equilibrium/sedimentation; 7: sedimentation; n.d.: data not available.*

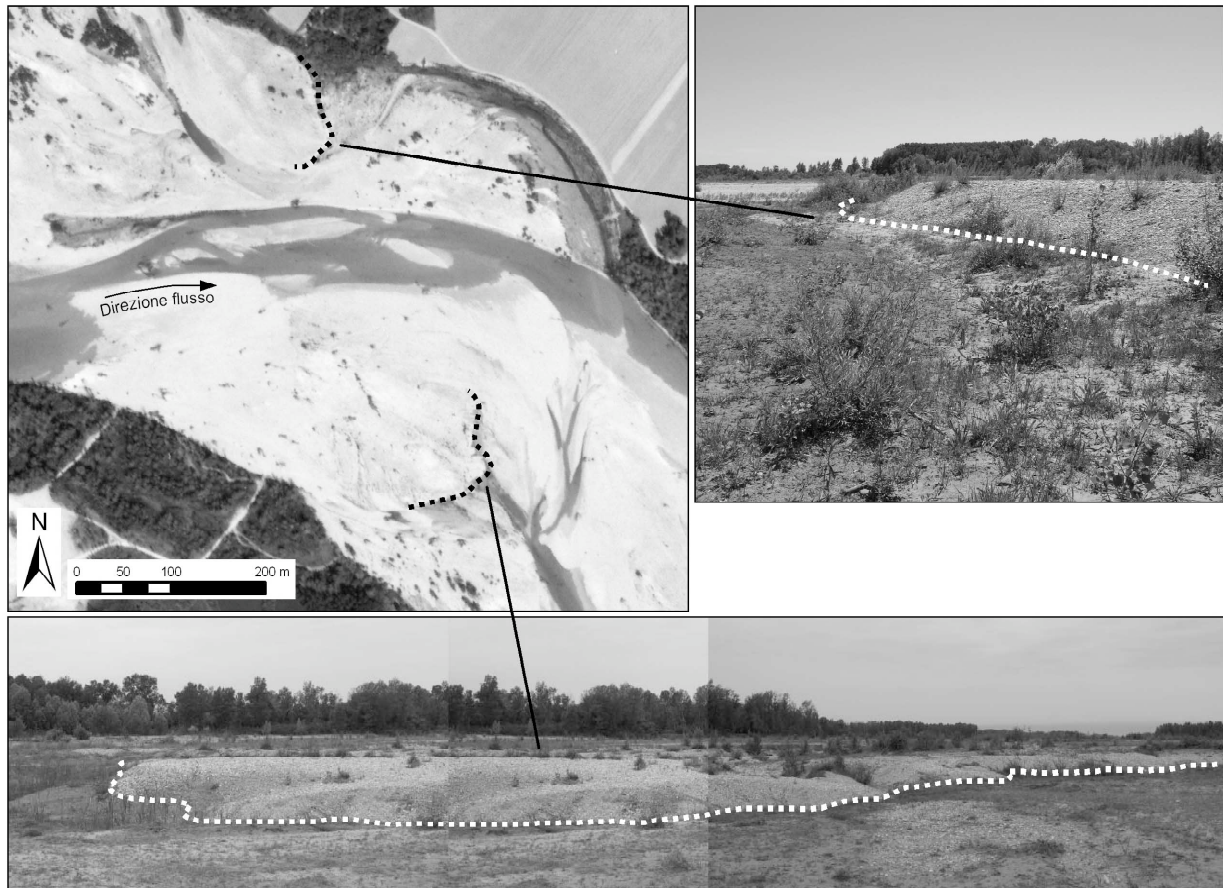


Fig. 4 - I lobi di sedimentazione, quando molto diffusi in un determinato tratto, sono stati tra gli indicatori più utilizzati per definire le tendenze evolutive nel breve termine (se supportati da altre evidenze possono indicare la presenza di una fase di sedimentazione). La foto aerea e le due foto di terreno, con indicate le fronti di grandi lobi di sedimentazione, sono relative al Fiume Tagliamento e sono state scattate rispettivamente nell'aprile e nel maggio del 2007.

*The sediment lobes are the evidence that has been more frequently used during the geomorphological survey to assess the evolutionary trend in the short period (if there is other evidence a sedimentation phase may eventually be inferred). The air photo and the two ground photos, where the front of large sediment lobes have been pointed out, show a reach of the Tagliamento River and they were taken in April 2007 and May 2007, respectively.*

sedimentazione. Va comunque segnalato che localmente, ad esempio in alcuni tratti del Piave nel Vallone Bellunese, la sedimentazione recente dell'alveo è stata di entità maggiore rispetto all'incisione del periodo precedente.

## 6. DISCUSSIONE

Da un punto di vista metodologico emergono delle differenze sostanziali fra l'analisi delle variazioni planimetriche (larghezza) e di quelle altimetriche degli alvei. La ricca documentazione disponibile (cartografia storica e foto aeree) e l'impiego dei GIS hanno consentito ricostruzioni molto affidabili della larghezza, anche perché gli errori associati a questo tipo di analisi risultano modesti se confrontati con le variazioni misurate. Al contrario è risultata più problematica la ricostruzione delle variazioni altimetriche. Seppure i rilievi topografici ed il rilevamento geomorfologico hanno consentito di riconoscere e quantificare due principali fasi di aggiustamento (incisione seguita da sedimentazione), in pochi casi è stato possibile ottenere dettagliate rico-

struzioni di tali fasi. In tal senso pare opportuno sottolineare l'importanza di continuare ad applicare ed affinare in futuro approcci di rilevamento come quello proposto da RINALDI (2008).

L'entità delle variazioni misurate è senz'altro notevole: basti pensare che in alcuni tratti tali variazioni hanno comportato una radicale trasformazione della morfologia dell'alveo, ad esempio da *braided* a sinuoso. D'altra parte, anche considerando i valori massimi di restringimento (73 %) e d'incisione (8,5 m), non si può affermare che i fiumi veneto-friulani rappresentino dei casi unici sia in un contesto nazionale (SURIAN & RINALDI, 2003 e 2004; RINALDI et al., 2005) che in riferimento a corsi d'acqua europei o extra-europei (WILLIAMS, 1978; WILLIAMS & WOLMAN, 1984; LIEBAULT & PIEGAY, 2002). Per quanto riguarda le variazioni altimetriche è però opportuno sottolineare che abbassamenti del fondo di 1-2 m in alvei larghi alcune centinaia di metri sono la conseguenza di una drastica variazione nel regime del trasporto solido (riduzione nel trasporto al fondo dell'ordine di alcuni milioni di m<sup>3</sup>) e quindi l'evidenza di una significativa condizione d'instabilità dell'alveo.

I risultati di questo studio, soprattutto quelli relati-

vi alla larghezza degli alvei, consentono un affinamento dei modelli finora proposti per l'evoluzione recente ed attuale dei corsi d'acqua italiani. Ad un primo schema evolutivo che prevedeva una sola fase di aggiustamento (SURIAN & RINALDI, 2003), era seguito, relativamente a corsi d'acqua *braided*, un modello che includeva tre fasi evolutive (SURIAN & RINALDI, 2004), in particolare una prima fase di moderato restringimento ed incisione, una seconda fase di forte restringimento ed incisione ed una terza fase caratterizzata da allargamento e da una certa stabilità altimetrica. Rispetto a questo ultimo modello l'evoluzione dei fiumi veneto-friulani suggerisce alcune novità per quanto riguarda la prima e l'ultima parte del periodo in esame. Nel corso del XIX sec. gli alvei mostrano nel complesso delle variazioni contenute e di diverso tipo (sia allargamento che restringimento), non tali da definire condizioni di instabilità. Pertanto, rispetto al modello di SURIAN & RINALDI (2004), risulterebbe l'esistenza di un'ulteriore fase, la prima, priva di significativi aggiustamenti. Per quanto riguarda la fase più recente, i risultati confermano che l'allargamento degli alvei è il processo dominante, ma indicano anche che esistono dei casi che si discostano da tale tendenza (il caso del Torre) e che l'allargamento è frequentemente associato a processi di sedimentazione (Fig. 3 e Tab. 7).

L'entità delle variazioni morfologiche e la loro cronologia suggeriscono un forte legame con i vari interventi antropici descritti in precedenza. Per quanto riguarda il primo aspetto, raramente in condizioni naturali i corsi d'acqua subiscono variazioni come quelle qui analizzate in periodi così brevi (RUMSBY & MACKLIN, 1994). L'altro aspetto significativo è la stretta correlazione temporale fra determinati interventi e le modificazioni degli alvei. Soprattutto per quanto riguarda il prelievo di sedimenti si può notare un'immediata risposta degli alvei e quindi "tempi di reazione" molto brevi.

Sulla base delle variazioni osservate e dei dati relativi agli interventi antropici si può quindi tentare di associare ad ogni fase evolutiva degli alvei i principali fattori di controllo.

Prima fase (XIX sec.): in questa fase l'intervento antropico più rilevante è stato la costruzione degli argini; ciò senza particolari effetti sulla morfologia degli alvei, probabilmente in relazione al fatto che gli argini sono stati generalmente posizionati in modo tale da mantenere uno spazio sufficientemente ampio di divagazione.

Seconda fase (prima metà del XX sec.): in questa fase di moderato aggiustamento (restringimento e probabile incisione) gli interventi più significativi sembrano essere le opere di difesa trasversali (pennelli), le sistemazioni idraulico-forestali e la riforestazione.

Terza fase (anni '50 - anni '80/'90): questa fase caratterizzata da intense modificazioni è determinata principalmente dal prelievo di sedimenti in alveo; questo intervento ha un effetto immediato sulla dinamica dei tratti esaminati e probabilmente prevale su altri tipi di intervento quali la costruzione delle dighe, le sistemazioni idraulico-forestali e la riforestazione; anche le opere di difesa, come nella fase precedente, continuano ad avere un ruolo significativo.

Quarta fase (ultimi 15-20 anni): rispetto alla fase precedente la variazione più rilevante è la marcata riduzione nel prelievo di sedimenti; questa variazione sembra essere la causa più plausibile dell'inversione di ten-

denza evolutiva osservata nella maggior parte dei tratti in esame.

## 7. CONCLUSIONI

1. Negli ultimi 200 anni gli alvei dei principali corsi d'acqua veneto-friulani (Brenta, Piave, Cellina, Tagliamento e Torre) hanno subito notevoli modificazioni. Gli alvei sono stati interessati da processi di restringimento (fino al 73 % nel caso del Piave in pianura e del Torre) e d'incisione (fino a 8,5 m nel tratto inferiore del Brenta) che solo in minima parte sono stati bilanciati da un'inversione di tendenza (allargamento e sedimentazione) degli ultimi 15-20 anni. Un aspetto che emerge dal confronto di questi corsi d'acqua è un comportamento molto simile sia per l'intensità che per lo sviluppo temporale delle variazioni morfologiche.

2. I risultati di queste ricerche confermano nel complesso l'applicabilità dei modelli concettuali esistenti (SURIAN & RINALDI, 2003 e 2004) ma suggeriscono anche che alcuni aspetti dovrebbero essere rivisti, naturalmente sulla base di una casistica più ampia di quella qui considerata. Innanzitutto non risulta esserci una fase di instabilità degli alvei nel corso del XIX sec., in quanto questi sono soggetti ad una prima fase di restringimento e, forse, d'incisione solo a partire dall'inizio del secolo scorso. In secondo luogo inizia a definirsi in modo più preciso la fase più recente di evoluzione (ultimi 15-20 anni): dal punto di vista planimetrico si conferma che il processo di allargamento è dominante, anche se non esclusivo, mentre per quanto riguarda l'altimetria degli alvei le situazioni più frequenti sono quelle di equilibrio e di sedimentazione.

3. Le cause delle forti variazioni morfologiche degli alvei sono una serie di interventi antropici che con tempi ed intensità differenti hanno avuto effetti diretti o indiretti sulla dinamica fluviale. Il prelievo di sedimenti e le opere di difesa in alveo, in ordine d'importanza, hanno avuto un ruolo determinante. Meno evidente, almeno per i tratti d'alveo qui esaminati, risulta essere il ruolo esercitato dalle dighe (ad eccezione del Cellina), dalle sistemazioni idraulico-forestali e dalla riforestazione. Come già evidenziato in studi precedenti (SURIAN & RINALDI, 2004; SURIAN, 2006; SURIAN & CISOTTO, 2007), si conferma che i vari interventi antropici hanno radicalmente alterato il regime del trasporto solido, mentre solo nel caso del Cellina è stata riscontrata una variazione significativa delle portate formative.

## RINGRAZIAMENTI

Ricerca realizzata nell'ambito del progetto PRIN 2005 "Dinamica recente ed attuale di alvei fluviali in Italia centro-settentrionale: tendenze evolutive, cause ed implicazioni applicative" (coordinatore nazionale: N. Surian). Si ringraziano Paolo Castello, Marco Da Canal, Lisa Mussio, Daniela Pasqualini, Matteo Zanatta e Francesco Zignol per aver contribuito, attraverso le loro tesi di laurea, alla conoscenza di alcuni dei casi di studio qui presentati. Ringraziamo inoltre Dorianò Castaldini e Susanna Perego per i loro commenti e suggerimenti che hanno permesso di migliorare la stesura definitiva di questo articolo.

## BIBLIOGRAFIA

- AGNOLETTI M. (1993) - *Gestione del bosco e segazione del legname nell'alta valle del Piave* - In: CANIATO G. (a cura di), *La via del Fiume. Dalle Dolomiti a Venezia*, pp. 73-126.
- AUTORITÀ DI BACINO DEI FIUMI ISONZO, TAGLIAMENTO, LIVENZA, PIAVE E BRENTA-BACCHIGLIONE (1998) - *Piano di Bacino del Fiume Tagliamento: Piano stralcio per la sicurezza idraulica del medio e basso corso* - Venezia, 118 pp.
- BRAVARD J.P., KONDOLF G.M. & PIEGAY H. (1999) - *Environmental and societal effects of channel incision and remedial strategies* - In: DARBY S.E. & SIMON A. (eds.), *Incised River Channels: Processes, Forms, Engineering and Management*, Wiley, pp. 303-341.
- CASTIGLIONI G.B. & PELLEGRINI G.B. (1981) - *Geomorfologia dell'alveo del Brenta nella pianura tra Bassano e Padova* - In: ZUNICA M. (a cura di), *Il territorio della Brenta*, Amm. Prov. di Padova - Università di Padova, pp. 12-32.
- DA CANAL M., COMITI F., SURIAN N., MAO L. & LENZI M.A. (2007) - *Studio delle variazioni morfologiche del F. Piave nel Vallone Bellunese durante gli ultimi duecento anni* - Quaderni di Idronomia Montana, **27**, pp. 259-271.
- DOWNS P.W. & GREGORY K.J. (2004) - *River channel management. Towards sustainable catchment hydrosystems* - Arnold, London, 395 pp.
- GURNELL A.M. (1997) - *Channel change of the river Dee meanders, 1946-1992, from the analysis of air photographs* - *Regulated Rivers: Research and Management*, **13**, pp. 13-26.
- HABERSACK H. & PIEGAY H. (2008) - *River restoration in the Alps and their surroundings: past experience and future challenges* - In: HABERSACK H., PIEGAY H. & RINALDI M. (eds), *Gravel-bed Rivers VI - From Process Understanding to River Restoration*, Developments in Earth Surface Processes, Elsevier, pp. 703-738.
- HUGHES M.L., McDOWELL P.F. & MARCUS W.A. (2006) - *Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS* - *Geomorphology*, **74**, pp. 1-16.
- LAMEDICA S., DALLA VALLE E., PILLI R. & ANFODILLO T. (2007) - *Variazioni di superficie e fissazione di carbonio in foresta nel territorio montano della Regione Veneto in riferimento all'applicazione del Protocollo di Kyoto* - *Forest@*, **4(3)**, pp. 283-297.
- LEOPOLD L.B. (1973) - *River channel change with time: an example* - *Geological Society of America Bulletin*, **84**, pp. 1845-1860.
- LIEBAULT F. & PIEGAY H. (2001) - *Assessment of channel changes due to long-term bedload supply decrease, Roubion River, France* - *Geomorphology*, **36**, pp. 167-186.
- LIEBAULT F. & PIEGAY H. (2002) - *Causes of 20<sup>th</sup> century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France* - *Earth Surf. Process. Landforms*, **27**, pp. 425-444.
- MUSSIO L. (2007) - *Ricostruzione dell'evoluzione morfologica dell'alveo del Torrente Cellina negli ultimi 200 anni mediante tecniche GIS* - Tesi di laurea inedita, Università di Padova, 56 pp.
- PETTS G.E. (1979) - *Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction* - *Progress in Physical Geography*, **3**, pp. 329-362.
- RINALDI M. (2008) - *Schede di rilevamento geomorfologico di alvei fluviali* - Il Quaternario, questo volume.
- RINALDI M., SIMONCINI C. & SOGNI D. (2005) - *Variazioni morfologiche recenti di due alvei ghiaiosi appenninici: il F. Trebbia ed il F. Vara*. Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, VII, pp. 313-319.
- RUMSBY B.T. & MACKLIN M.G. (1994) - *Channel and floodplain response to recent abrupt climate change, the Tyne basin, northern England* - *Earth Surface Processes and Landforms*, **19**, pp. 499-515.
- SURIAN N. (1999) - *Channel changes due to river regulation: the case of the Piave River, Italy* - *Earth Surf. Process. Landforms*, **24**, pp. 1135-1151.
- SURIAN N. (2003) - *Impatto antropico sulla dinamica recente del Fiume Piave (Alpi orientali)*. In: BIANCOTTI A. & MOTTA M. (a cura di), *Risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali*, M.I.U.R., Glauco Brigati, Genova, pp. 425-440.
- SURIAN N. (2006) - *Effects of human impact on braided river morphology: examples from Northern Italy* - In: SAMBROOK SMITH G. H., BEST J. L., BRISTOW C. & PETTS G. E. (eds.), *Braided Rivers*, IAS Special Publication 36, Blackwell Science, pp. 327-338.
- SURIAN N. & CISOTTO A. (2007) - *Channel adjustments, bedload transport and sediment sources in a gravel-bed river, Brenta River, Italy* - *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**, pp. 1641-1656.
- SURIAN N., PASQUALINI D. & TUNIS G. (2007) - *La dinamica dell'alveo del Torrente Torre (Pianura Friulana) nel corso degli ultimi due secoli* - Quaderni dell'Accademia delle Scienze di Torino (sottoposto).
- SURIAN N., PELLEGRINI G.B. & SCOMAZZON E. (2005) - *Variazioni morfologiche dell'alveo del Fiume Brenta indotte da interventi antropici* - *Suppl. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, VII, pp. 339-345.
- SURIAN N. & RINALDI M. (2003) - *Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy* - *Geomorphology*, **50**, pp. 307-326.
- SURIAN N. & RINALDI M. (2004) - *Channel adjustments in response to human alteration of sediment fluxes: examples from Italian rivers* - In: GOLOSOV V., BELYAEV V. & WALLING D.E. (eds.), *Sediment transfer through the fluvial system*, IAHS Publ. 288, pp. 276-282.
- VOLLO L. (1942) - *Le piene dei fiumi veneti e i provvedimenti di difesa. Il Piave* - Le Monnier, Firenze, 336 pp.
- WILLIAMS G.P. (1978) - *The case of the shrinking channels - the North Platte and Platte Rivers in Nebraska* - U.S. Geological Survey Circular, 781, 48 pp.
- WILLIAMS G.P. & WOLMAN M.G. (1984) - *Downstream effects of dams on alluvial rivers* - U.S. Geological Survey Professional Paper, 1286, 83 pp.
- WINTERBOTTOM S.J. (2000) - *Medium and short-term channel planform changes on the Rivers Tay and Tummel, Scotland* - *Geomorphology*, **34**, pp. 195-208.
- WYZGA B. (1993) - *River response to channel regulation: case study of the Raba River, Carpathians, Poland* - *Earth Surface Processes and Landforms*, **18**, pp. 541-556.

Ms. ricevuto il 2 gennaio 2008  
 Testo definitivo ricevuto l'8 maggio 2008

Ms. received: January 2, 2008  
 Final text received: May 8, 2008