



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Corso di laurea in:
TUTELA E RIASSETTO DEL TERRITORIO

**REGIME DEI DEFLUSSI E MODIFICAZIONI
MORFOLOGICHE: ANALISI STATISTICA
DEL FIUME BRENTA NEL CORSO DEGLI
ULTIMI 30 ANNI**

Relatore:

Prof. Mario Aristide Lenzi

Correlatori:

Rigon Emanuel

Moretto Johnny

Laureando:

Matteo Zanella

Matricola n. 571662

ANNO ACCADEMICO 2011 - 2012

INDICE GENERALE

RIASSUNTO	1
ABSTRACT	2
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE	4
CAPITOLO 2 LA MORFOLOGIA FLUVIALE	6
2.1 - Il sistema fluviale forme e processi	6
2.2 - Modificazione della forma fluviale	12
2.3 -Le portate formative	34
2.4 - Mobilità laterale ed erosione delle sponde	38
2.5 - Variazioni morfologiche dei corsi d'acqua italiani	41
CAPITOLO 3 PARAMETRI IDROLOGICI DEI CORSI D'ACQUA	44
3.1 - Misura e registro delle portate	44
3.2 - Analisi statistica delle portate	47
3.3 - Analisi statistica della relazione tra variabili idrologiche e morfologiche, test di (AICc)	51
CAPITOLO 4 STUDI PREGRESSI RIGUARDANTI LE RELAZIONI TRA VARIAZIONI IDROLOGICHE E MORFOLOGICHE DI UN FIUME	56
CAPITOLO 5 IL FIUME BRENTA	58
5.1 - Il bacino idrografico del fiume Brenta	58
5.2 - Tratto di studio: inquadramento globale	61
5.3 - Tratto di studio: caratteristiche morfologiche e morfometriche	62

5.4 - Evoluzione morfologica del fiume e studi pregressi	65
CAPITOLO 6 MATERIALI E METODI	66
6.1 - Aerofotogrammetria ed interpretazione delle foto aeree	66
6.1.1 - Accuratezza delle misure e possibili fonti di errore	69
6.2 - Interpretazione di foto aeree sul Fiume Brenta	71
6.3 - Serie storica dei dati idrologici sul Fiume Brenta	72
6.4 - Catalogazione dei dati e creazione del <i>dataset</i>	74
6.5 - Variabili Morfometriche considerate	76
6.6 - Variabili Idrologiche - Temporali considerate	77
6.7 - Analisi Statistica dei dati riguardanti il fiume Brenta	78
6.7.1 - Applicazione dell'AICc con il programma statistico R	79
CAPITOLO 7 RISULTATI E DISCUSSIONI	82
7.1 - Analisi dei dati idrologici del fiume Brenta	82
7.2 - Analisi dei dati morfologici del fiume Brenta	83
7.3 - Variabili idro - morfologiche a confronto	86
7.4 - Analisi effetto portata - tempo su diversa scala spaziale e temporale	95
7.4.1 - Effetti sull'alveo attivo	95
7.4.2 - Effetti sulle Isole fluviali	97
7.5 - Indicazione quantitativa effetto portata – tempo	98
7.6 - Scenari ideali tempo – portata: indicazioni per gestione	100

CAPITOLO 8 CONCLUSIONI	104
Bibliografia	105
Ringraziamenti	113

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Serie di foto aeree realizzate nel tratto in questione del Fiume Brenta.	71
Tabella 2 : Catalogazione delle date di ogni foto Aerea.	74
Tabella 3 : Analisi delle date delle foto aeree.	75
Tabella 4 : Variabili morfologiche considerate.	76
Tabella 5 : Variabili idrologiche considerate.	77
Tabella 6 : Risultati analisi <i>dataset</i> semplificato.	89
Tabella 7: Valori di AICc per ogni variabile, derivante dalla tabella risultati semplificata, in ordine decrescente.	90
Tabella 8: Risultati analisi <i>dataset</i> completo.	92
Tabella 9 : Confronto tra dataset completo e semplificato riguardanti l'alveo attivo delle variabili considerate.	95
Tabella 10 : Confronto tra dataset completo e semplificato riguardanti la differenza delle isole nelle variabili considerate.	97
Tabella 11 : <i>Dataset</i> semplificato riguardante le variabili considerate.	99
Tabella 12: Parametri di variazione dell'alveo attivo.	100

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 : Il corso d'acqua paragonato ad un nastro trasportatore di sedimenti. (Modificato da Kondolf, 1994).	7
Figura 2 : Principali processi di interscambio di sedimenti nelle tre zone di un bacino idrografico. (Modificato da Sear <i>et al.</i> , 2003).	8
Figura 3: Grado di confinamento e dimensioni dei corsi d'acqua nelle diverse zone del bacino. (Modificato da Brierley & Fryirs, 2005 e da Church, 1992).	9
Figura 4 : Classificazione dei principali tipi di barre. (Da Kellerhals <i>et al.</i> , 1976).	13
Figura 5 : tratto <i>riffle - pool</i>	15
Figura 6 : Tratto rettilineo	17
Figura 7 : Tratto a canali intrecciati	18
Figura 8: Tratto meandriforme	19
Figura 9 : Schemi esemplificativi sulle migrazioni di meandro (Da dispense Lenzi 2007)	20
Figura 10: Classificazione delle morfologie fluviali (Schumm 1977).	21
Figura 11: Tipi di alvei fluviali (Da Brice 1975).	23
Figura 12 : Classificazione delle morfologie fluviali e trasporto solido (Church (1992)	24
Figura13 : Classificazione delle morfologie fluviali (Rosgen 1994).	26
Figura 14 : Unità morfologiche tipiche dei torrenti montani (Montgomery & Buffington 1997)	29

Figura 15: Scheda di rilevamento delle unità morfologiche nei torrenti alpini (Da LENZI et al., 2000).	33
Figura 16 : Concetto di portata dominante o efficace (Wolman & Miller 1960).	36
Figura 17 :Modello concettuale dei processi dominanti di arretramento di sponde fluviali in un sistema fluviale. (Modificato da Lawler, 1992 e da Rinaldi & Darby, 2008).	38
Figura 18: Schema di classificazione delle variazioni morfologiche di fiumi italiani. (Da Surian & Rinaldi, 2003, modificato).	41
Figura 19 : Tipico andamento temporale della quota del fondo in risposta a disturbi antropici durante gli ultimi 100 anni circa osservato per vari fiumi italiani. (Da Surian & Rinaldi, 2004)	42
Figura 20: Esempio di scala delle portate. (Dispense Rinaldi, 2002)	45
Figura 21 : Esempio di Asta idrometrica	46
Figura 22: Relativa stazione idrometrica presso il fiume Posina a Stancari (VI).	46
Figura 23 : Rappresentazione del bacino montano del Brenta (Tonini M., Pulselli U. in A.A.V.V., 1981).	58
Figura 24: Panoramica a Fontaniva; e relativo tratto del fiume Brenta	59
Figura 25 : Veduta del fiume Brenta a Nove.	60
Figura 26 : Inquadramento geografico dell'area di studio. In evidenza i sottotratti analizzati (Moretto <i>et al.</i> , 2012)	61
Figura 27 : Primo sottotratto analizzato presso il comune di Nove.	62
Figura 28: Secondo sottotratto analizzato presso il comune di Friola.	63
Figura 29 : Terzo sottotratto analizzato presso il comune di Fontaniva.	64
Figura 30: Esempio di “strisciata” aerea.	67

Figura 31 : Esempio di digitalizzazione fotografica.	67
Figura 32: Idrogramma riguardante la stazione di Barzizza dal 1924 al 2011. (Moretto <i>et al.</i> , 2012)	73
Figura 33: Logo del marchio R	79
Figura 34 : Script di R per l'applicazione di AICc	80
Figura 35 : Esempio di modello applicativo	80
Figura 36 : Grafici di variazione a scala di sottotratto	84
Figura 37 : Evoluzione dei sottotratti Nove, Friola e Fontaniva dal 1981 al 2011. (Moretto <i>et al.</i> , 2012)	85
Figura 38 : Variazione temporale della superficie dell'alveo attivo e massimo annuale delle portate registrate nel tratto di Fiume Brenta analizzato	86
Figura 39 : Grafico raffigurante i valori di AICc a confronto dalla tabella risultati semplificata.	90
Figura 40: Box plot del valore di AICc a confronto per le diverse variabili morfologiche e <i>dataset</i> .	93
Figura 41: Grafico raffigurante i valori di AICc a confronto dalla tabella risultati completa.	94
Figura 42 Erosione delle fondamenta di una struttura.	103
Figura 43 : Erosione spondale con relativo danno della strada.	103
Figura 44 : Diga detritica naturale fra le colonne di un ponte.	104

RIASSUNTO

In questo studio è stato analizzato un tratto di circa 20 Km del Fiume Brenta compreso tra Bassano del Grappa e Piazzola sul Brenta che nel passato è stato interessato da alterazioni antropiche come l'edificazione di dighe a scopi idroelettrici ed attività di estrazione in alveo.

Il tratto è caratterizzato da una morfologia “*braided*” e “*wandering*”, ha un'ampiezza della piana alluvionale compresa tra 70 m e 800 m e una pendenza media dello 0,0035 %.

L'obiettivo che ci siamo posti è stato quello di valutare se sussistono delle correlazioni tra le modificazioni morfologiche e le variabili idrologiche. Per raggiungere questo intento siamo partiti dalle serie storiche dei livelli idrometrici registrati alla stazione di Cà Barzizza (Bassano del Grappa, VI) e da nove serie di foto aeree scattate negli ultimi 30 anni.

Gli annali idrologici compresi tra il 1924 ed il 2011 sono stati trattati statisticamente in maniera da ottenere la distribuzione annuale delle portate, la curva di durata e frequenza della piene, nonché l'analisi delle piene di maggiore intensità. Per verificare le variazioni della vegetazione riparia e della morfologia d'alveo sono state analizzate e foto-interpretate con software GIS nove serie di foto aeree scattate sempre in condizioni di basso livello idrico negli anni 1981, 1990, 1994, 1999, 2003, 2006, 2008, 2010, 2011.

Queste serie di dati sono state riassunte in un *dataset* da cui abbiamo estratto 9 variabili idrologiche e 16 variabili morfologiche sia a scala di tratto che di sottotratto.

E' stato eseguita una regressione statistica tramite l'utilizzo di una metodologia recente (AICc) dalla quale è emerso che sia a scala di tratto intero che di sottotratto, il tempo e la somma delle portate al di sopra della *bankfull*. Queste variabili possono essere utilizzate anche a scopi gestionali, in quanto possono aiutare a capire l'evoluzione futura del corso d'acqua.

ABSTRACT

In this study we analyzed a Brenta reach of about 20 km between Bassano del Grappa and Piazzola sul Brenta, which in the past has been affected by anthropogenic alterations such as the construction of dams to generate electricity and mining activity in the river bed.

This reach is characterized by a morphology "braided" and "wandering", has a floodplain width between 70 m and 800 m, and an average gradient of 0.0035%.

Our goal was to assess the correlations between morphological adjustments and the hydrological variables. To achieve this aim we started from the time series of water levels recorded at gauging station at "Cà Barzizza" (Bassano del Grappa, VI) and from nine sets of aerial photographs taken in the last 30 years.

The hydrological records between 1924 and 2011 were statistically processed in order to obtain the annual distribution of the flow, the curve of duration and frequency of floods and mayor flood analysis. The changes in riparian vegetation and morphology adjustments of riverbed were obtained from photo-interpretation with GIS software, nine sets of aerial photographs taken under conditions of low water level in the years 1981, 1990, 1994, 1999, 2003, 2006, 2008, 2010, 2011.

These data were summarized in a dataset, and from which we extracted 9 hydrological variables and 16 morphological variables both on a reach and sub-reaches

Was performed a statistical regression through a recent methodology (AICC). It 'was found that the time and the sum of the discharge above the *bankfull*, are significantly correlated with the morphological adjustments both sub-reaches and reach scale. These variables can also be used for management purposes, as they can help to understand the future evolution of the watercourse.

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Durante gli ultimi decenni la maggior parte dei corsi d'acqua europei hanno subito delle profonde modificazioni morfologiche. Gli adattamenti geomorfologici dei fiumi possono essere legati ad una risposta ai processi naturali ed antropici. I primi sono legati principalmente al regime idrologico ed agli eventi di piena, che sono una diretta conseguenza delle precipitazioni, e quindi più in generale del clima. Le modificazioni indotte dall'uomo possono essere causate dal cambiamento dell'uso del suolo, dalle opere di sistemazione idraulico forestale e dallo sfruttamento della risorsa idrica e dei sedimenti. Tutte queste attività hanno modificato i naturali processi erosivi - sedimentologici con conseguenze sulla morfologia e funzionalità fluviale. La ricerca scientifica ha aumentato il proprio interesse su questi temi (ad es. Liébault and Piégay, 2002; Gurnell *et al.*, 2009; Surian *et al.*, 2009; Comiti *et al.*, 2011).

Gli effetti geomorfologici delle piene sono frequentemente studiati sia da un punto di vista della gestione del rischio idraulico (ad es. Krapesh, 2011) sia per definire una corretta gestione dell'ecosistema fluviale e per progettare opere di riqualificazione fluviale (ad es. Doering *et al.*, 2012).

Le Direttive Europee Alluvioni e Acqua (*Directive 2000/60/EC water framework Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks*) prevedono tra gli altri obiettivi la mappatura delle aree a rischio di alluvioni con diversi tempi di ritorno ed il miglioramento delle condizioni dei sistemi fluviali (qualità idromorfologica). Per raggiungere questi obiettivi risulta indispensabile avere a disposizione degli strumenti di previsione della dinamica fluviale.

In questo studio è stato analizzato un tratto del Fiume Brenta di pianura (tra Bassano del Grappa e Piazzola sul Brenta), che nel passato è stato interessato da alterazioni antropiche come l'edificazione di dighe a scopi idroelettrici ed attività di estrazione in alveo (Surian and Cisotto, 2009; Moretto *et al.*, 2012). Questo lavoro si propone di valutare la relazione che sussiste tra la morfologia fluviale, definita essenzialmente dalla larghezza dell'alveo di piene rive, ed il regime delle portate (idrogramma). Le dimensioni morfologiche del fiume sono state ottenute attraverso la misura in ambiente georiferito di foto aeree dal 1981 al 2011, mentre l'idrogramma è quello registrato a Barzizza (Basano del Grappa, Vi) con intervallo giornaliero, (Moretto *et al.*, 2012). Queste due serie di dati sono stati analizzati con strumenti di regressione statistica al fine di valutare se i cambiamenti nella larghezza del canale sono dovuti al regime idrologico e all'accadimento degli eventi di piena. Si ipotizza che: i) all'aumentare del numero e della magnitudo degli eventi di piena corrisponda un'aumento della superficie dell'alveo attivo; ii) lunghi periodi con portate inferiori alla portata di piene rive determini un restringimento del canale, grazie anche all'attività colonizzatrice della vegetazione riparia.

Scopo finale è quello di determinare se le variazioni morfologiche del fiume Brenta negli ultimi 30 anni (Moretto *et al.*, 2012) sono dovute a fluttuazioni nella serie idrologica, o se sono legati ad altri fattori. Inoltre si cercherà di determinare quali sono le variabili (ad es. portata cumulata o numero di giorni in cui la portata alla *bankfull* è superata) che meglio si correlano all'evoluzione della larghezza dell'alveo.

Le indicazioni che si possono ottenere sono di vitale importanza per capire quali sono i fattori determinati l'adattamento nel tempo dei corsi d' acqua così da dare delle indicazioni in termini di gestione e pianificazione efficace del territorio, mettendo insieme sia aspetti legati alla sicurezza idraulica, che alla qualità idromorfologica fluviale e degli ambienti circostanti.

CAPITOLO 2

LA MORFOLOGIA FLUVIALE

Un corso d'acqua lungo il suo percorso modifica continuamente le sue caratteristiche, i fattori sono i più svariati a partire da quelli climatici, idraulici, idrologici, geomorfologici, ecologici e non per ultimi quelli antropici che sommati fra loro vanno a modificare il così detto "sistema fluviale". Di seguito saranno elencati le principali classificazioni morfologiche ed i processi che caratterizzano i corsi d'acqua.

2.1 - Il sistema fluviale forme e processi

Con sistema fluviale o reticolo idrografico intendiamo in generale tutto ciò che comprende il bacino che stiamo studiando, esso ne descrive tutte le caratteristiche sia dal punto di vista morfologico che idraulico ed idrologico considerando perciò moltissimi parametri.

Quelli principali sono i parametri geometrici, quelli idraulico-sedimentologici e quelli riguardanti la configurazione del corso d'acqua. Ne elencheremo alcuni per rendere l'idea.

Parametri geometrici:

- *Pendenza*: parametro più importante per la determinazione delle caratteristiche idrauliche, morfologiche e biologiche in un collettore idraulico;
- *Grado intrecciamento*: esprime il numero di barre ed isole; e espresso come rapporto tra la larghezza del collettore in condizioni di piena e la somma delle larghezze dei singoli rami in condizioni di flusso normale;
- *Grado di confinamento*: spiega quanto il fiume si può allargare in condizioni di piena, le possibilità che lasciano le sponde di allargarsi, misurato come rapporto fra la larghezza della piana alluvionale e la larghezza della *bankfull*;
- *Rapporto larghezza/Profondità*.
- *Sinuosità*: indica l'andamento del fiume, misurato come il rapporto tra la lunghezza del corso d'acqua e la lunghezza dell'asse della valle;

Parametri idraulico-sedimentologico:

- *Portata a "piene rive"*: la quantità d'acqua che riempie l'alveo da riva a riva;
- *Trasporto solido totale*: formato da una componente di fondo e da una in sospensione;

- *Granulometria*: valuta la componente granulometrica del materiale di fondo, che condiziona il trasporto solido e la resistenza al moto e all'erosione;

Configurazione di un corso d'acqua:

- *Planimetria*: illustra come il corso d'acqua defluisce all'interno del suo bacino idrografico;

- *Sezione trasversale*: indica il grado di incisione del canale nella valle;

- *Profilo longitudinale*;

Per una perfetta descrizione di un sistema fluviale dovremmo imbatterci nella descrizione di tutti i parametri sopra riportati, ci vengono in aiuto alcune classificazioni che nel corso degli anni si sono evolute sempre più facilitando il percorso di studio dei fiumi.

Per capire meglio proseguendo con la stesura andremo man mano a spiegare il significato di alcuni termini che formano gli elementi del tracciato fluviale e le varie classificazioni che ci aiuteranno a determinare la “ fisionomia idraulica ” del corso d'acqua.

Partiamo dalla semplice suddivisione del sistema fluviale che fa parte di un bacino idrografico in tre zone secondo lo schema proposto da Schumm nel 1977 (Figura 1):

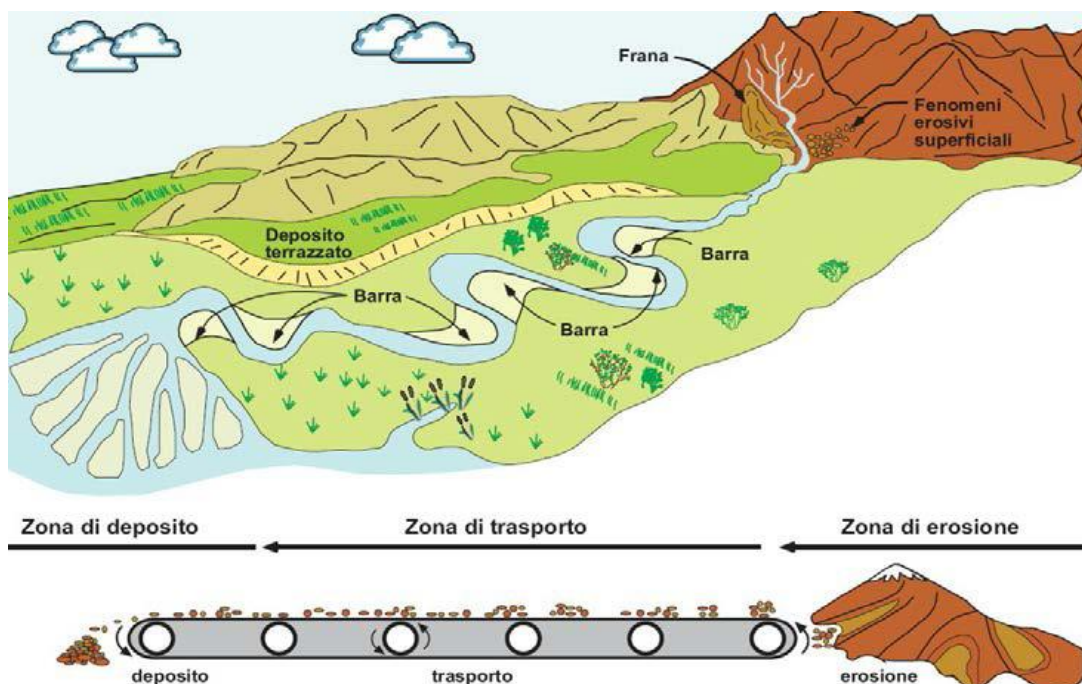


Figura 1 : Il corso d'acqua paragonato ad un nastro trasportatore di sedimenti.
(Modificato da Kondolf, 1994).

- La zona 1 (**Sorgente**) rappresenta la porzione alta del bacino, nella quale prevalgono i processi che determinano la produzione di sedimenti (erosione, frane);
- La zona 2, (**Corso del fiume**) caratterizzata prevalentemente dal trasferimento di sedimenti verso valle da parte dei corsi d'acqua principali del sistema;
- La zona 3 (**Foce**) costituisce la porzione più valliva del bacino idrografico e rappresenta l'area di prevalente accumulo di sedimenti.

I corsi d'acqua convogliano sedimenti dalle zone sorgenti nelle porzioni alte del bacino, attraverso la zona di trasferimento, alle pianure alluvionali che rappresentano le zone di accumulo.

Tale suddivisione riflette la prevalenza, in ognuna delle tre zone, di una delle tre principali categorie di processi: erosione (produzione di sedimenti), trasporto solido (trasferimento di sedimenti verso valle), sedimentazione (immagazzinamento di sedimenti).

Secondo tale schema idealizzato, il corso d'acqua è paragonabile ad un nastro trasportatore: una sua funzione essenziale è quella di trasferire sedimenti dalle zone di origine (versanti) verso le zone di recapito finale del sistema.

Tuttavia le tre categorie di processi agiscono, in misura diversa, in ogni tratto del sistema fluviale, in particolar modo nei tratti in cui il corso d'acqua è di tipo alluvionale a fondo mobile, dove si realizzano continui scambi di sedimenti tra le sponde ed il fondo.

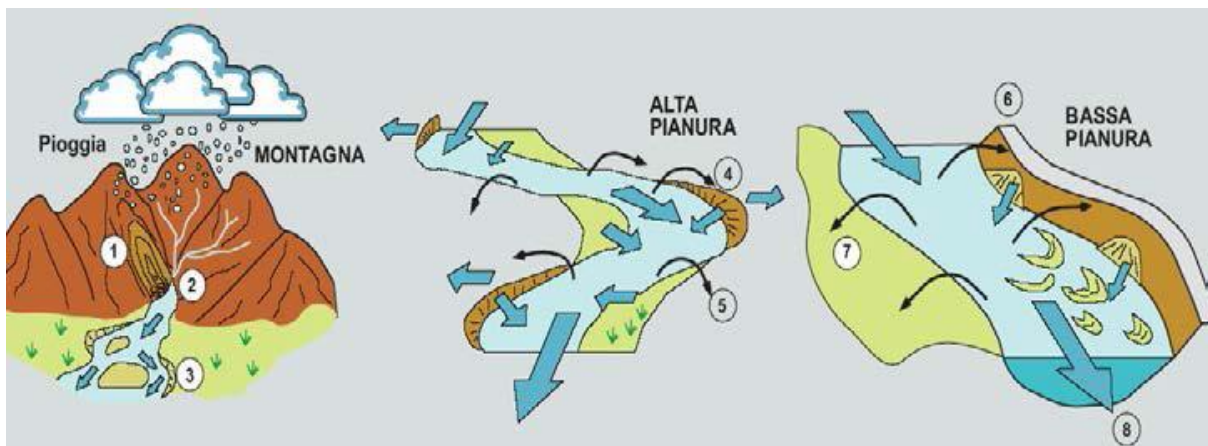


Figura 2 : Principali processi di interscambio di sedimenti nelle tre zone di un bacino idrografico.

(Modificato da Sear *et al.*, 2003).

Dalla figura possiamo comprendere la suddivisione delle 3 zone e con la numerazione vengono descritti i processi che gli innescano:

-Zona montana di produzione di sedimenti: (1) frane; (2) alimentazione ed eventuale sbarramento da parte dei sedimenti in alveo; (3) sedimentazione in alveo ed erosione delle sponde.

-Zona di trasferimento di sedimenti (alta pianura): (4) erosione delle sponde ed accrezione delle barre; (5) costruzione delle sponde per tracimazione.

-Zona di accumulo di sedimenti (bassa pianura): (6) erosione delle sponde per movimenti di massa; (7) deposizione di sedimenti fini nella piana inondabile; (8) trasporto di *wash load* dei sedimenti fini al mare.

La suddivisione del sistema in zone ed in processi dominanti riflette anche altre caratteristiche fisiche dei corsi d'acqua, quali il confinamento e le dimensioni. Infatti si possono distinguere tre situazioni in base al grado di confinamento dei corsi d'acqua:

- (1) nella zona collinare - montana prevalgono i corsi d'acqua confinati tra versanti;
- (2) nella zona pedemontana i corsi d'acqua sono prevalentemente semiconfinati;
- (3) una volta raggiunta la zona di deposizione prevalgono i corsi d'acqua non confinati in pianure alluvionali.

È tuttavia possibile un'alternanza di tratti non confinati e confinati laddove il corso d'acqua attraversa bacini compresi all'interno di catene montuose o rilievi collinari.

Per quanto riguarda le dimensioni dei corsi d'acqua, esse aumentano sistematicamente attraverso il sistema fluviale al crescere dell'area di drenaggio e quindi delle portate liquide.

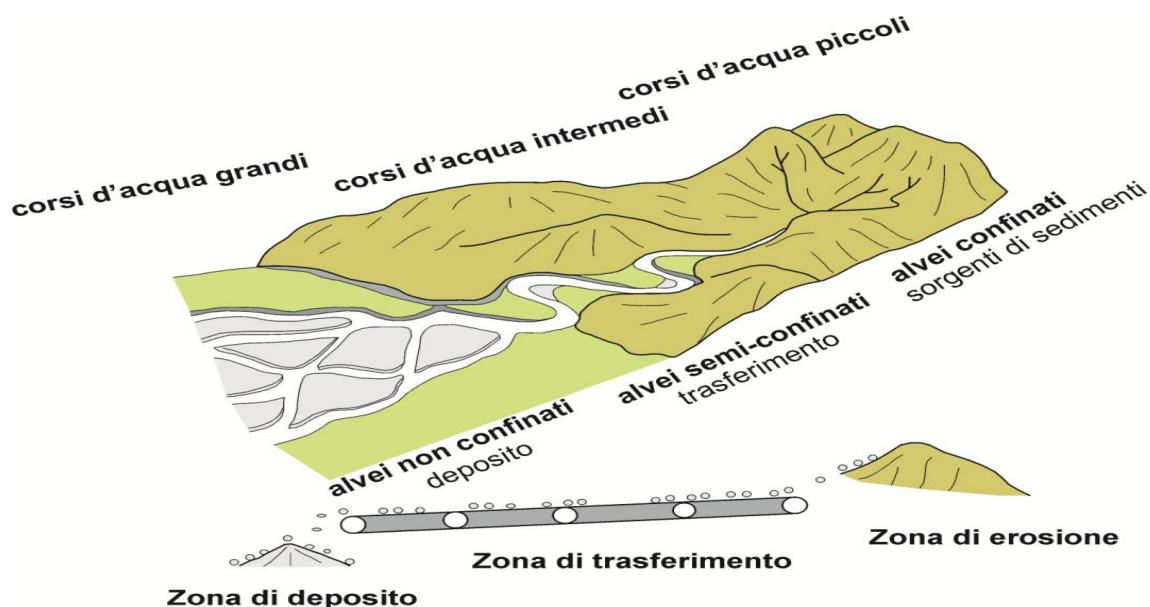


Figura 3: Grado di confinamento e dimensioni dei corsi d'acqua nelle diverse zone del bacino.

(Modificato da Brierley & Fryirs, 2005 e da Church, 1992).

Andiamo a vedere un attimo più in profondità i 3 processi elencati in precedenza.

Erosione: I processi di erosione sono determinati in primo luogo da una rimozione da parte della corrente fluviale di particelle presenti nel fondo o nelle sponde dovuta specialmente dalla pendenza e quindi alla velocità dell'acqua che passando o sbattendo continuamente contro le pareti o il fondo lo erode pian piano. Questi processi si ingrandiscono qualora i materiali che formano le sponde o il fondo siano costituiti di rocce friabili o inerti fragili e che quindi si riesca a portar via più di qualche piccola particella.

Trasporto Solido: Il trasporto solido dei corsi d'acqua è un fenomeno dovuto a numerosi fattori quali il clima, i caratteri idraulici della corrente, la litologia, la morfologia e le dimensioni del bacino idrografico, la morfologia dell'alveo fluviale, l'attività umana nel bacino e lungo l'alveo fluviale stesso. La conoscenza del trasporto solido di un fiume è di grande interesse per cercare di sanare alcuni problemi quali ad esempio: irrigazione, produzione di energia, navigabilità e problemi territoriali come sistemazione di bacini idrografici e piani di bacino.

Il trasporto solido di un corso d'acqua può essere schematicamente suddiviso in:

- 1) trasporto solido in soluzione: lo troviamo in corsi d'acqua che drenano in rocce solubili.
- 2) trasporto solido per fluitazione (o flottazione): è costituito prevalentemente da materiali vegetali galleggianti, a seguito dello sradicamento di arbusti e di tronchi da parte della corrente. In particolari condizioni climatiche possono essere trasportati blocchi e frammenti di ghiaccio. Il trasporto di materiali vegetali può essere causa di ostruzioni parziali o totali delle luci dei ponti o di altri manufatti, causando un innalzamento del pelo libero a monte dell'ostruzione per effetto di rigurgito, che può determinare esondazioni delle portate di piena.
- 3) trasporto solido in sospensione: per molti fiumi costituisce la frazione più importante del trasporto solido totale. Questo tipo di trasporto è utilmente suddivisibile in due porzioni in base alla grandezza del materiale che trasportano. Il Trasporto solido che sposta porzioni di materiale più fine ha origine dai versanti durante un periodo piovoso e si muove direttamente fino alle zone di sedimentazione (quali laghi, zone palustri o mare), senza intervenire nella dinamica dell'alveo.

Il trasporto in sospensione vero e proprio al contrario può essere sedimentato nell'alveo stesso in zone o in periodi di minore capacità di trasporto della corrente.

- 4) trasporto solido al fondo: è costituito dai sedimenti che si muovono sul fondo o a bassa distanza da questo per saltellamento, rotolamento, trascinamento, ecc., come elementi singoli o come movimento generalizzato di tutti i granuli di ogni dimensione.

5) flusso di detriti e di fango: si tratta del movimento di una massa di detriti o di fango che, completamente imbevuta di acqua, si muove comportandosi essa stessa come un fluido.

Sedimentazione: Si possono schematicamente distinguere 2 processi di sedimentazione, quella laterale e quella verticale, anche se di solito agiscono in combinazione. La sedimentazione laterale è quella legata alla migrazione delle barre nei canali attivi, nei sistemi a canali intrecciati, o al tipico processo di accrescimento della barra di meandro nei sistemi meandriformi. La sedimentazione verticale è quella dovuta a tracimazione (*overbank*), la quale determina una progressiva accrezione verticale del prisma alluvionale, il cui tasso dipende da numerosi fattori quali la produzione di sedimenti nel bacino, il tasso di subsidenza, le variazioni climatiche e del livello marino.

Troviamo poi alcune forme di deposizione all'interno della pianura alluvionale caratterizzati da diversi processi di tracimazione che originano tipi differenti di depositi fluviali:

a) depositi di argine naturale: sono corpi sedimentari formati prevalentemente da sabbie fini o limi sabbiosi, con sezione triangolare asimmetrica, con pendenza forte verso l'interno del canale e più dolce verso la pianura.

b) depositi di rotta o crevasse: sono originati da tracimazione nella pianura e presentano in genere forma di lobo, lingua o ventaglio, come un piccolo delta o una conoide.

c) depositi di piana inondabile: sono i materiali più fini del sistema (limo e argilla di decantazione, con rare intercalazioni più sabbiose).

d) depositi di canale abbandonato: sono dovuti all'abbandono ed al riempimento di canali, e sono prevalentemente formati da limo e argilla ricchi di sostanza organica, con rare intercalazioni sabbiose.

Lo studio dei caratteri sedimentari di un alveo fluviale, ed in particolare delle granulometrie presenti sul fondo, riveste una particolare importanza perché fornisce indicazioni sul tipo e sulle dimensioni del materiale coinvolto nel trasporto solido. Le caratteristiche granulometriche dei sedimenti del letto variano anche notevolmente in senso longitudinale e trasversale, sia procedendo da monte verso valle (per i processi di abrasione e di azione selettiva della corrente ed in rapporto agli apporti laterali degli affluenti), che in relazione alle diverse unità morfologiche che compongono l'alveo (canale, barra, *riffle*, *pool*, ecc.). In molti alvei fluviali il cui fondo è costituito da sedimenti eterogenei sufficientemente grossolani (ghiaia, ciottoli), esiste inoltre una differenziazione granulometrica anche in senso verticale dal momento che tende a svilupparsi un livello superficiale di dimensioni granulometriche superiori rispetto al livello sottostante.

I termini riguardanti la morfologia fluviale che abbiamo utilizzato verranno di seguito spiegati.

2.2 - Modificazione della forma fluviale

Abbiamo posto le basi per capire come un corso d'acqua si modifica nel corso del tempo analizzando solamente l'aspetto erosivo, dobbiamo poi contare tutte le cause antropiche e climatiche/geomorfologiche che possono subentrare ed andare ad aiutare le altre nella modifica della forma fluviale.

Andremo ora a spiegare i termini utilizzati in precedenza riguardanti gli elementi del tracciato fluviale ma prima per collegarci al discorso precedente ricondurremo per semplicità gli alvei fluviali in 2 categorie; Alvei a fondo fisso ed alvei a fondo mobile.

1) Gli **alvei a fondo fisso** di solito sono incisi in roccia massiva, pressoché privi di sedimenti ad esclusione di grandi blocchi che invadono l'alveo;

2) Gli **alvei a fondo mobile** di solito sono incisi in sedimenti incoerenti o poco coerenti con sponde dello stesso materiale o roccia massiva.

Nel primo gruppo sono compresi tutti gli alvei che, essendo interessati da correnti con elevata energia e quindi velocità, sono capaci di smaltire tutti i sedimenti via via che questi raggiungono l'alveo o che in esso si accumulano. Si tratta generalmente di alvei in zone montane con forti pendenze, in erosione più o meno accentuata a seconda delle caratteristiche geomorfologiche, climatologiche e litologiche.

Gli alvei principali di un bacino idrografico rientrano invece nel secondo gruppo: in essi i sedimenti presenti in alveo, o nella pianura alluvionale in cui questo è inciso, possono essere trasportati costituendo essi stessi una sorgente di sedimenti che si somma a quella dei versanti; al contrario l'alveo può consentire la sedimentazione di materiale proveniente da monte. La mobilità dei materiali costituenti l'alveo consente a questo una maggiore variabilità planimetrica e del profilo altimetrico.

Consideriamo un tratto di limitata lunghezza di un alveo fluviale a fondo mobile, in esso si possono distinguere varie superfici geomorfologiche, poste a quote topografiche differenti in relazione alla frequenza con cui esse sono soggette all'azione della corrente quindi avremo elementi di origine erosiva quali i canali di deflusso e le pozze, di origine deposizionale quali le barre, le piane alluvionali, i raschi, i salti ed elementi di origine "mista" che si compongono di entrambi quali i meandri e varie forme di fondo.

-Il Canale: in un fiume perenne è quella parte dell'alveo che risulta totalmente o parzialmente ricoperta di acqua per la maggior parte delle portate che interessano il fiume. Si distinguono per questo in canali di magra, di morbida e di piena a seconda dell'entità della corrente idrica che li forma; essi si distinguono molto bene nei fiumi con fondo e sponde di materiale coesivo quindi facili da modellare.

-Le Barre: sono dei corpi sedimentari incluse nell'alveo attivo prive di vegetazione perenne e rappresentano le superfici fluviali topograficamente più basse, leggermente al di sopra del canale che risultano completamente emerse durante i deflussi di magra. Si possono distinguere vari tipi di barre in base alla loro posizione all'interno dell'alveo; barre longitudinali, laterali, oblique, trasversali, laterali, di mediana ecc. Alcuni tipi sono caratteristici di una determinata morfologia. Le barre laterali per esempio sono in genere caratteristiche di alvei rettilinei o a bassa sinuosità, dove si alternano in sponda destra e sinistra. Quando la sinuosità dell'alveo cresce, tendono a formarsi barre di meandro nella parte interna delle curve. Le barre longitudinali sono invece tipiche di alvei a canali intrecciati. Le barre possono accrescere e diminuire in qualsiasi momento ameno che non siano posizionati in punti dove si stabilizzano completamente.

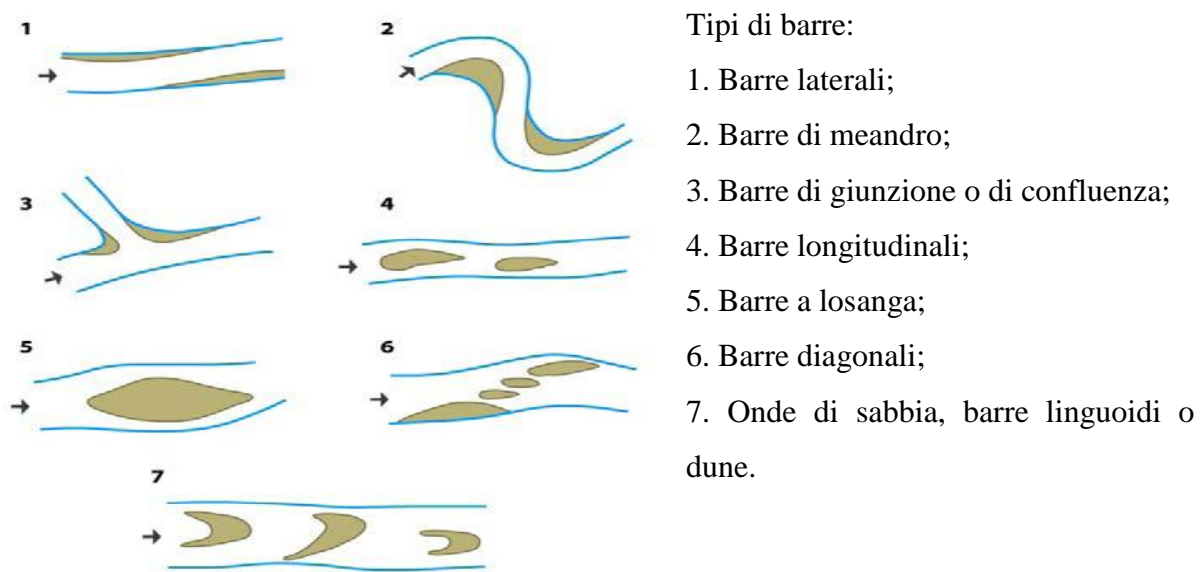


Figura 4 : Classificazione dei principali tipi di barre.

(Da Kellerhals *et al.*, 1976).

-Le Piane alluvionali fanno parte dei siti di immagazzinamento di sedimento esse sono poste in adiacenza al corso d'acqua formando una progressiva sedimentazione sia all'interno che

all'esterno dell'alveo. Formano una vera e propria piana detritica all'interno dell'area esondabile del fiume.

Le piane sono elementi molto importanti perché preservano la registrazione della storia climatica, idrologica ed antropica di un bacino idrografico tramite i sedimenti in essa contenuti, fanno un po' da filtro accumulando inquinanti trasportati assieme ai sedimenti e rappresentano l'area più densamente popolata della parte inferiore dei bacini idrografici.

-La piana inondabile: costituisce una superficie pianeggiante costruita dal fiume in determinate condizioni climatiche, che in genere viene inondata mediamente una volta ogni 1 - 3 anni. Il livello idrometrico in grado di raggiungere la pianura inondabile è definito livello ad alveo pieno (*bankfull stage*), a cui corrisponde la cosiddetta portata ad alveo pieno (*bankfull discharge*). In molti casi le aree che soddisfano la definizione di pianura inondabile rappresentano solo una piccola porzione di fondovalle nelle immediate adiacenze dell'alveo. In alcuni alvei possono essere presenti forme di transizione tra barre e pianura inondabile (*channel shelf*).

-Le Sponde: sono costituite da superfici con una certa inclinazione o da vere e proprie scarpate che separano tra di loro due delle forme definite prima. Esse possono essere schematicamente suddivise in sponde basse e sponde alte, a seconda del dislivello tra le diverse superfici fluviali che separano. Le sponde basse sono ad esempio caratteristiche di situazioni in accrescimento come sulla parte interna di un meandro; le sponde alte possono invece essere caratteristiche di situazioni di erosione come nel corrispondente lato esterno del meandro, dove la sponda raccorda direttamente il canale con la piana o con la barra.

-I Raschi (*riffles*) rappresentano nel profilo longitudinale degli alti topografici formati di solito da materiali di grossa dimensione esse possono essere visti anche come barre trasversali sommerse.

-I Salti (*steps*) con essi intendiamo qualsiasi salto che l'acqua fa nel passaggio dovuti per esempio anche a qualche masso o aggregato legnoso o a erosioni del terreno più alte.

-Le Pozze (*pools*) derivano dall'azione dell'erosione localizzata causata dalla forte velocità della corrente magari dopo un salto o un *riffle*. Possono essere viste come i freni dei corsi d'acqua.

- Le Sequenze *riffle e pool*: rappresentano una caratteristica comune a pressoché tutti gli alvei ghiaiosi nei quali c'è una certa eterogeneità del materiale presente sul fondo.

Si può infatti distinguere una alternanza più o meno regolare di tratti meno profondi (*riffles*) e tratti più profondi (*pools*), i primi caratterizzati da altezza d'acqua minore e velocità della corrente maggiore e viceversa.

I *riffles* sono caratterizzati da granulometrie più grossolane mentre la superficie dei *pools* può essere costituita da un più ampio fuso granulometrico, interessando materiale anche molto più fine. La distanza tra un *riffe* e il successivo è in genere funzione della larghezza del canale e varia da 4 a 6 volte la larghezza stessa.



Figura 5 : tratto *rifle - pool*

-I Meandri: sono un andamento planimetrico sinuoso costituito da una o più anse che si susseguono per lo più regolarmente lungo un tratto del corso d'acqua. Lo spostamento dei meandri avviene attraverso l'erosione fluviale che si verifica a spese della sponda esterna della curva, in corrispondenza della quale si concentrano le massime velocità della corrente. All'erosione di sponda esterna si contrappone un fenomeno di sedimentazione sulla sponda interna, dove le velocità sono invece minime. L'alveo nel suo insieme subisce così continui spostamenti laterali, attraverso i quali migra e costruisce la pianura inondabile. Questo fenomeno viene più facile nel tratto in cui le sponde hanno una granulometria più morbida quindi più facile da deformare.

-Le Forme di fondo: rappresentano la parte inferiore di un corso d'acqua, come sappiamo raramente si presenta con un fondo piano, specialmente su granulometrie fini (sabbia), la corrente modella il fondo in base alla propria velocità. Possiamo dividerle in base al regime dell'acqua in regime inferiore o subcritico e regime superiore o critico-supercritico. Nel primo regime troviamo i *ripples* che sono piccole onde di forma triangolare che si formano quando

il sottostrato viscoso è superiore al diametro dei grani, sono quindi influenzati dalla viscosità del fluido.

In condizioni di fondo idraulicamente scabro, le forme di fondo diventano più grandi pur mantenendo una forma triangolare, simili alle dune dei deserti dette proprio delle dune.

In prossimità della cresta si ha distacco dello strato limite e formazione di una zona di separazione a valle, dove si ha minor velocità ma forte turbolenza. La lunghezza d'onda varia da qualche metro a qualche decina, essenzialmente in funzione del tirante.

Nel secondo regime abbiamo un aumento di velocità che va a lisciare il fondo creando un fondo piano o a regolarizzare la forma delle dune creando le antidune ed in terza fase può regolarizzare le duna e quindi distanziarle creando delle antidune con frangimento d'onda.

Conoscendo i termini di base possiamo ora procedere come già detto in precedenza alla classificazione morfologica dei sistemi fluviali. Prima però va fatta una distinzione tra i fiumi ed i torrenti.

I primi sono corsi d'acqua perenni caratterizzati da pendenze e velocità della corrente molto basse, accompagnate da una granulometria fine del sedimento. I torrenti invece hanno importanti variazioni altimetriche con pendenze anche maggiori al 4% e velocità molto variabili; le velocità di deflusso nei tributari minori possono variare dagli 0,2 m/s, nei periodi di magra, fino ai 10 m/s raggiungibili nei periodi con intense precipitazioni.

Le classificazioni dei sistemi fluviali sono numerose e a diversi livelli di dettaglio ma non esistono limiti netti tra un tipo morfologico ed un altro. Si possono basare su diversi criteri:

- in base alla Localizzazione all'interno del bacino (tratto montano pedemontano vallivo)
- in base a criteri Geometrici (canali meandri formi, a canali intrecciati, rettilinei, ecc)
- in base a criteri sedimentologici (corsi d'acqua in roccia, ghiaiosi, sabbiosi, ecc)
- in base alla dinamica evolutiva (tratto di scavo, di trasporto, di deposito)
- in base alle forme di fondo (tratto a gradinata, a letto piano, a dune, ecc) ed
- in base a criteri combinati, cioè utilizzando più criteri per uno stesso tratto di studio.

Iniziamo con la classificazione dei fiumi;

A partire dal primo tentativo di classificazione proposto da Leopold & Wolman (1957), sono stati distinti tre tipi principali di alvei mobili: rettilinei (*straight*), a canali intrecciati (*braided*) e meandriiformi (*meandering*).

-Gli **alvei rettilinei** sono piuttosto rari in natura e generalmente non si riscontrano per tratti più lunghi di 10 volte la larghezza. Anche se le sponde sono rettilinee, il filone principale segue spesso un percorso leggermente sinuoso, legato alla presenza di barre alternate. Il parametro sinuosità assume valori prossimi all'unità, sia per portate di piena che di morbida.

Si formano prevalentemente in zone montane, dove le pendenze sono elevate con forte alimentazione di sedimenti grossolani. I corsi d'acqua rettilinei di montagna occupano lo stretto fondo di valli a V e possiedono una piana alluvionale poco sviluppata.

Sono comuni gli affioramenti rocciosi; se essi predominano allora l'alveo viene definito a fondo fisso e ciò indica una capacità di trasporto nettamente maggiore dell'alimentazione solida. L'evoluzione morfologica degli alvei scavati in roccia è molto più lenta di quelli alluvionali (cioè che scorrono sui propri sedimenti) ed è legata alle caratteristiche litologiche del substrato. La dinamica dei corsi d'acqua rettilinei è piuttosto limitata date le condizioni al contorno molto vincolanti. Data la ristrettezza della piana alluvionale, sono poco frequenti fenomeni di avulsione (abbandono dell'alveo e formazione di un nuovo canale).

Al contrario, erosioni di sponda e modifiche del profilo longitudinale (incisione-sovralluvionamento) sono processi comuni e fonte di problematiche per la sicurezza idraulica.



Figura 6 : Tratto rettilineo

-I fiumi a canali intrecciati (*braided*) sono definiti come quelli in cui l'alveo è frequentemente suddiviso da barre in due o più canali. Essi sono piuttosto comuni e si sviluppano in una grande varietà di ambienti. Nelle aree peri glaciali (clima temperato umido o freddo) complessi sistemi *braided* si formano su ampie pianure alluvionali ghiaiose, mentre negli ambienti semi-aridi si hanno larghi fiumi a canali intrecciati ad alvei sabbiosi.

In ambiente alpino, si trovano spesso in zona montana al fondo delle valli glaciali fino alla zona pedemontana, fin dove l'alveo è prevalentemente formato da ghiaia. La loro formazione è favorita da condizioni energetiche (pendenza) sostenute, portate molto variabili, elevato trasporto solido di fondo e sponde non coesive.

Presentano alvei molto ampi costituiti da due o più canali con presenza di *riffle* e *pool* di simili dimensioni che si intersecano separati da barre longitudinali e isole a forma di losanga.

Nei fiumi *braided* si osservano barre poste a diversi livelli topografici; essi sono caratterizzati da elevata dinamicità, con spostamento delle barre e dei canali durante eventi di piena. Le migrazioni laterali avvengono per lo più all'interno dell'alveo di piena, e soltanto durante eventi eccezionali si hanno modifiche del suo tracciato planimetrico con anche fenomeni di avulsione, specialmente se il fiume scorre su un conoide alluvionale.



Figura 7 : Tratto a canali intrecciati

-I **fiumi meandriiformi** sono definiti come quelli aventi una sinuosità (definita come il rapporto tra lunghezza misurata lungo l'alveo e lunghezza misurata lungo la valle) convenzionalmente maggiore o uguale a 1.5. Il tracciato planimetrico di questa tipologia mostra anse curvilinee (dette appunto meandri) che si susseguono in modo più o meno ripetitivo e regolare. Sono i fiumi maggiormente studiati, per la loro presenza nei territori da più tempo antropizzati.



Figura 8: Tratto meandriiforme

Generalmente presentano una granulometria sabbiosa oppure limo-argillosa, essendo le pendenze molto basse, si hanno comunque casi di fiumi meandriformi in ghiaia. Questa tipologia fluviale è quella predominante delle valli a bassa pendenza. I tratti di pool si trovano in corrispondenza dell'apice della curva mentre i *riffle* sono presenti nel punto di inflessione tra due meandri contigui. La parte interna della curva è occupata dalla barra di meandro, che si presenta come un corpo sedimentario semiconico, con una base a forma di mezzaluna, leggermente inclinato verso la sponda esterna che ha invece andamento subverticale. Anche in queste barre si assiste ad una certa segregazione granulometrica da monte a valle. Il meccanismo di formazione dei meandri è tuttora controverso.

Alcuni autori vedono nell'instabilità di un flusso lineare formazioni di correnti secondarie e vortici la causa primaria, mentre altri pongono l'accento sull'instabilità dell'alveo che determina perturbazioni, come le barre, che tenderebbero ad amplificarsi fino a condurre all'erosione spondale. Condizione necessaria è comunque che le sponde siano erodibili ma non eccessivamente instabili. L'andamento meandriforme riduce la pendenza della valle ed aumenta la resistenza al moto, essendo le curve una fonte aggiuntiva di scabrezza quindi la formazione di meandri può venir vista sotto il profilo termodinamico come un meccanismo per ridurre un eccesso di energia cinetica. La migrazione dei meandri avviene per la concomitanza di erosione della sponda esterna e sedimentazione in quella interna durante gli eventi di piena. Questo meccanismo combinato porta il meandro a spostarsi sia trasversalmente che longitudinalmente, seguito dalla sua barra. La migrazione dei meandri porta ad un aumento di sinuosità che può determinare alla fine il cosiddetto taglio di collo del meandro, quando il sottile istmo separante le due sponde esterne di due meandri contigui cede durante una piena. Il flusso tenderà poi a concentrarsi sul nuovo percorso più diretto, abbandonando progressivamente il meandro tagliato, che diviene un laghetto a forma di mezza luna (lanca), in cui vanno a depositarsi i sedimenti fini di esondazione, fino ad inglobarlo nella pianura alluvionale.

Nei fiumi con minore sinuosità e sedimenti più grossolani, si assiste invece più frequentemente al taglio di barra di meandro. Nella figura 9 vengono descritte alcune forme di cambio di alveo del fiume.

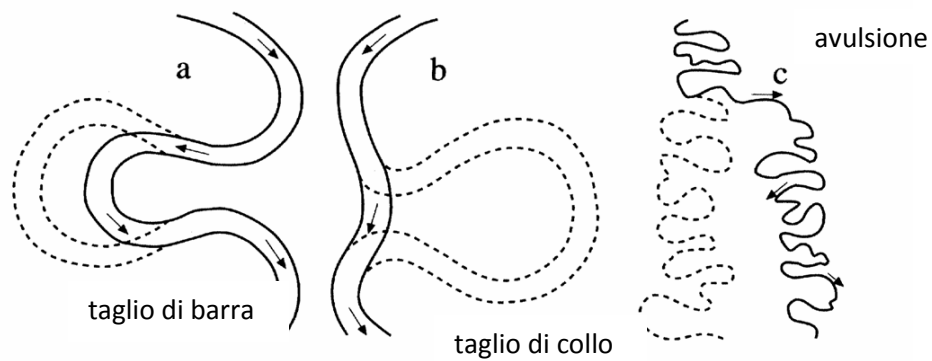


Figura 9 : Schemi esemplificativi sulle migrazioni di meandro
(Da dispense Lenzi 2007)

Schumm nel 1963, basandosi anche su risultati ricavati da esperienze di laboratorio, ha suggerito uno schema classificativo basato sul tipo di trasporto solido prevalente, mettendo in evidenza le strette relazioni tra tipi di alveo, modalità di trasporto solido, condizioni di stabilità e processi dominanti. Sono distinti 5 tipi principali di forme di alveo in funzione del tipo di trasporto solido (*Bed-load, Mixed-load, Suspended-load*). In particolare si può notare una successione dei tre tipi principali d'alveo definiti da Leopold & Wolman al variare della pendenza. Alvei di tipo rettilineo sono associabili ai minimi valori di pendenza ed a condizioni di bassa energia. Aumentando il campo delle pendenze, aumenta progressivamente la sinuosità del canale; successivamente si cominciano a manifestare i primi caratteri di intrecciamento. Al di sopra di un certo valore di soglia della pendenza si verifica una brusca caduta del valore della sinuosità che segna il passaggio ad un alveo a canali intrecciati, caratterizzato dalle più alte condizioni energetiche della corrente, in cui le sponde più esterne riassumono un andamento circa rettilineo. In alvei di tipo rettilineo, il canale si identifica quasi con l'alveo di piena ed è in una situazione di relativa stabilità. In alvei a trasporto misto o con trasporto di fondo prevalente, il canale di magra è normalmente molto più limitato in larghezza rispetto all'alveo di piena, presenta una sinuosità maggiore ed una stabilità minore. In alvei a canali intrecciati la stabilità dei canali, delle barre e delle sponde è ancora minore e la forma dei canali varia anche in modo rilevante in un unico evento di piena. Un'altra tipologia di alvei fluviali che ha ricevuto molta minore attenzione rispetto ai meandriformi e a quelli a canali intrecciati, essendo piuttosto rara in natura, è costituita dai fiumi **anastomizzati**.

Si tratta di alvei multicanali, nei quali ogni singolo canale presenta una medio - alta sinuosità. I canali sono separati tra di loro da porzioni di pianura inondabile, cioè da isole stabilizzate da vegetazione, piuttosto che da barre attive come avviene normalmente per gli alvei a canali intrecciati. Le zone che dividono i rami non sono barre soggette a migrazione come nei fiumi *braided*, bensì porzioni di piana alluvionale con dimensioni molto maggiori della larghezza del canale. Sono piuttosto rari, si osservano in aree dove il corso d'acqua tende ad accrescere i processi deposizionali, in seguito a rapida subsidenza o repentino innalzamento del livello di base. I singoli canali morfologicamente sono spesso dei corsi meandriformi, con una simile evoluzione (tagli e migrazione dei meandri). Tuttavia la dinamica nei fiumi anastomizzati è più lenta in quanto la coesione delle sponde molto elevata comporta una grande stabilità dell'alveo.

Negli anni successivi, in particolare nell'ultimo decennio, la classica suddivisione proposta inizialmente da Leopold & Wolman si è rivelata molto spesso inadeguata per descrivere molte morfologie fluviali. Così si è progressivamente affermato il concetto secondo il quale si ha un continuo passaggio da una forma morfologica all'altra, piuttosto che dei limiti ben definiti. Si possono osservare cioè numerose forme intermedie in cui i caratteri di sinuosità e di intrecciamento possono coesistere in diversa misura.

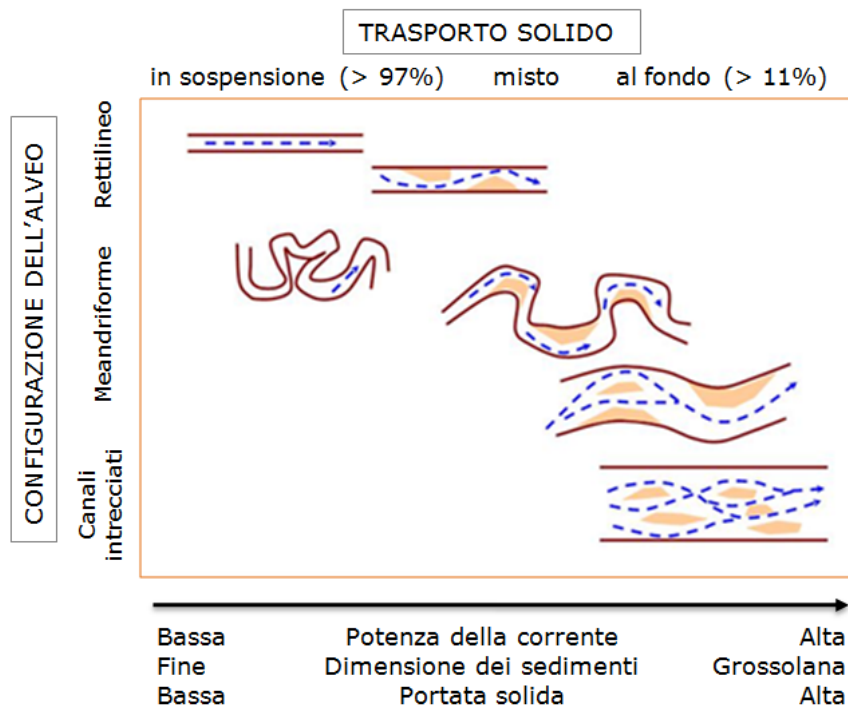


Figura 10: Classificazione delle morfologie fluviali secondo Schumm (1977).

Kellerhalls et *et al* nel 1976 hanno proposto una classificazione basata soprattutto sulla descrizione delle principali forme e processi presenti, distinguendo gli alvei in base a tre principali caratteristiche: a) Configurazione planimetrica, b) Isole fluviali, c) Barre e maggiori forme di fondo. (Figura 4)

Spesso si osserva in uno stesso fiume una variazione progressiva da monte verso valle di morfologie diverse associabili con differenti condizioni energetiche della corrente. Alcune delle numerose classificazioni proposte dopo quella originaria di Leopold & Wolman (1957), riflettono tale concetto e considerano una più vasta gamma di forme planimetriche.

Brice nel 1975 propone ad esempio una classificazione descrittiva molto generale, basata sulle caratteristiche planimetriche di un alveo distinguendo tra caratteri di sinuosità, di intrecciamento e di anastomizzazione. Secondo tale schema di classificazione, quando la sinuosità è minore di 1.05 l'alveo è considerato rettilineo, altrimenti può essere sinuoso (sinuosità compresa tra 1.05 e 1.25) o meandriforme (sinuosità maggiore di 1.25). Un tratto di fiume può anche essere descritto in base al grado di intrecciamento, corrispondente alla percentuale di lunghezza in cui è presente più di un canale e, in maniera simile, dal grado di anastomizzazione, definito come percentuale della lunghezza del tratto occupato da isole fluviali, cioè barre longitudinali relativamente stabilizzate e di notevoli dimensioni in rapporto alla larghezza dell'alveo. Brice & Blodgett (1978) suggeriscono la distinzione in quattro tipi di alvei di cui i due intermedi rappresentano forme di transizione tra meandriforme e a canali intrecciati in base alle seguenti caratteristiche (Figura 11):

Caratteri di sinuosità: a) Alveo profondo con larghezza uniforme; b) Alveo con larghezza uniforme; c) Alveo più largo nelle curve, con rari canali di taglio; d) Alveo più largo nelle curve, con canali di taglio comuni; e) Variazioni irregolari della larghezza; f) Canale di magra sinuoso all'interno dell'alveo di piena; g) Sinuosità dell'alveo di piena bimodale.

Caratteri di intrecciamento: a) Barre prevalenti; b) Barre e isole; c) Isole prevalenti, con forme diverse; d) Isole prevalenti, lunghe e strette.

Caratteri di anastomizzazione: a) Canali sinuosi al lato dell'alveo principale; b) Canali anastomizzati derivanti da tagli di meandro; c) Canali anastomizzati sinuosi; d) Canali anastomizzati subparalleli; e) Composito.

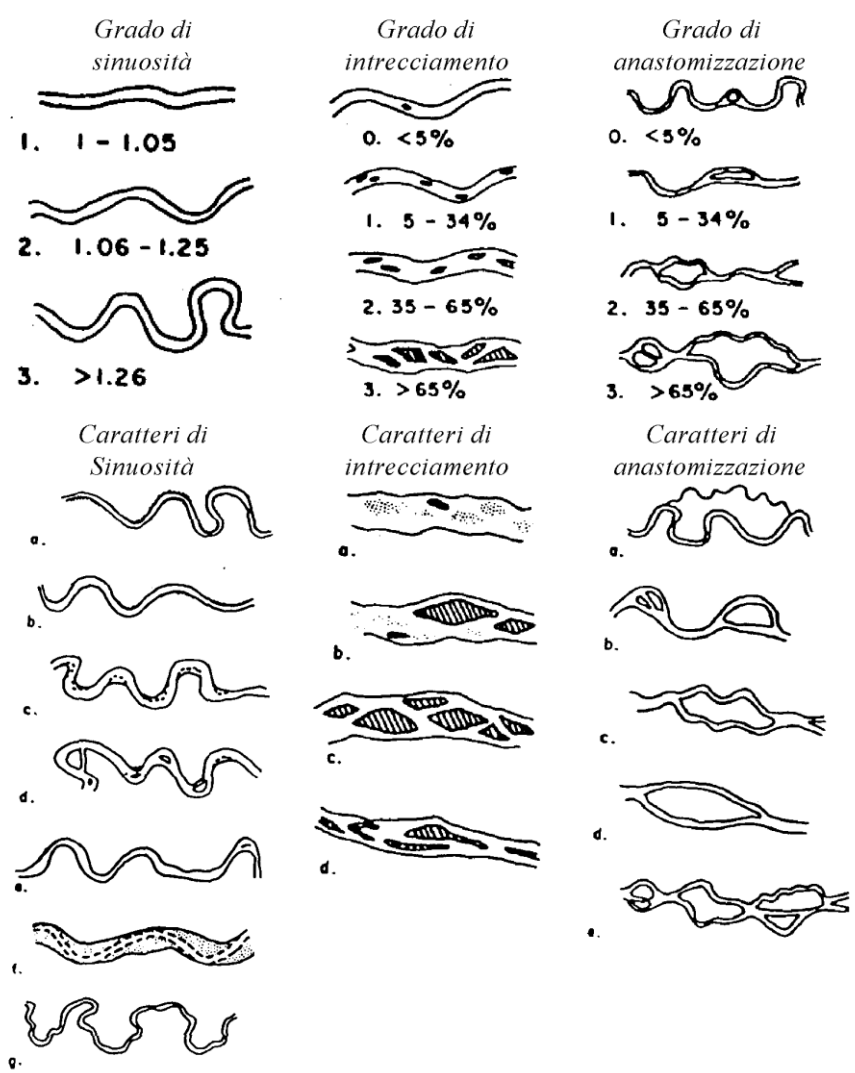


Figura 11: Tipi di alvei fluviali
(Da Brice 1975).

Altri schemi di classificazione esprimanti il legame tra tipo di trasporto solido prevalente, forme fluviali e stabilità (similmente a quello originario di Schumm, 1963) sono quelli proposti dallo stesso Schumm (1985) e da Church (1992). Quest'ultimo, riferendosi soprattutto a morfologie fluviali osservate in British Columbia (Canada), separa le morfologie fluviali in tre fasi (fase con alimentazione di trasporto al fondo dominante, fase di transizione, fase con alimentazione di trasporto in sospensione dominante), ognuna delle quali può a sua volta presentare una varietà di morfologie a seconda della alimentazione di sedimenti.

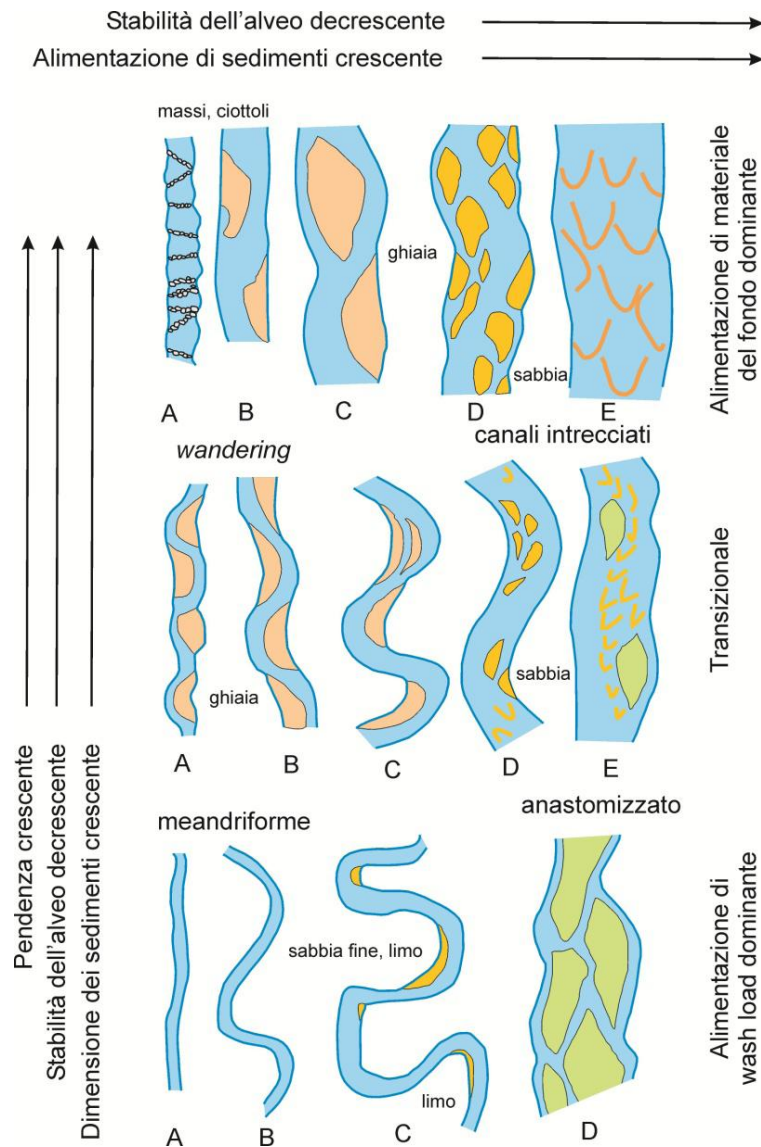


Figura 12 : Classificazione delle morfologie fluviali e trasporto solido secondo Church (1992).

Un'ultima classificazione recente è quella proposta da Rosgen (1994), sviluppata utilizzando dati provenienti da 450 fiumi di Stati Uniti, Canada e Nuova Zelanda . Attraverso tale classificazione i fiumi naturali, sia quelli a fondo fisso che a fondo mobile, vengono distinti in 9 principali categorie (Aa+, A, B, C, D, DA, E, F, G) sulla base dei seguenti parametri: rapporto di confinamento (*entrenchment ratio*) (definito come rapporto tra larghezza dell'area inondabile e larghezza dell'alveo pieno), rapporto tra larghezza e profondità, sinuosità, pendenza.

In questa classificazione compare anche una tipologia di alveo non presente nelle altre classificazioni, quella di **wandering o canali pseudomeandriformi**.

Con tale termine vengono in genere indicate morfologie con caratteri transizionali tra canali intrecciati (braided) ed anastomizzati (o talora tra canali intrecciati e meandriformi). Presentano una sinuosità medio bassa (1.3 - 1.5). Sono caratterizzati da barre laterali alternate con spesso forma a mezza luna, e da un solo canale attivo principale. Sono presenti invece canali secondari aderenti ad una delle due sponde, attivi (canale di taglio) o inattivi (canale di morta). Sulle barre si hanno inoltre canali secondari trasversali. Il primo si forma durante piene di una certa entità per taglio longitudinale della barra laterale, e può successivamente occludersi e venir abbandonato, od al contrario allargarsi e diventare il canale principale. Il canale di morta rappresenta la parte terminale di un canale ormai inattivo, alimentato solo durante le piene con acqua stagnante per portate medio - basse. La barra che lo delimita tende ad allungarsi e a chiuderlo progressivamente, favorendo così la deposizione di sedimento fine (sabbia-limo) durante la fase recessiva delle piene.

Caratteristica principale di questi corsi d'acqua è la variazione di sinuosità al variare della portata: per portate di magra e morbida le barre sono emerse ed il flusso assume un aspetto meandriforme che poi va perso quando durante eventi di piena anche modesti le barre laterali diventano sommerse e la sinuosità si avvicina all'unità, essendo le sponde generalmente parallele e quasi rettilinee. Altra differenza rispetto ai fiumi meandriformi è la dinamica delle barre: in questi le barre di meandro tendono a muoversi trasversalmente alla direzione principale a causa delle correnti secondarie, mentre nei *wanderingrivers* le barre si spostano verso valle più similmente alle barre laterali dei corsi d'acqua rettilinei. Come queste inoltre, presentano granulometria eterogenea, dalla ghiaia alla sabbia. Sono state rilevate in fiumi appenninici velocità medie di migrazione delle barre dell'ordine dei 20-30 m all'anno, con punte di 60 - 70m . Alla migrazione delle barre sono spesso associati anche fenomeni di erosione spondale. I fiumi pseudomeandriformi sono ritenuti da molti una forma di "evoluzione" dei corsi *braided* derivante dalle influenze antropiche citate in precedenza. Attualmente i *wandering rivers* sono molto comuni in Italia e in molte aree alpine.

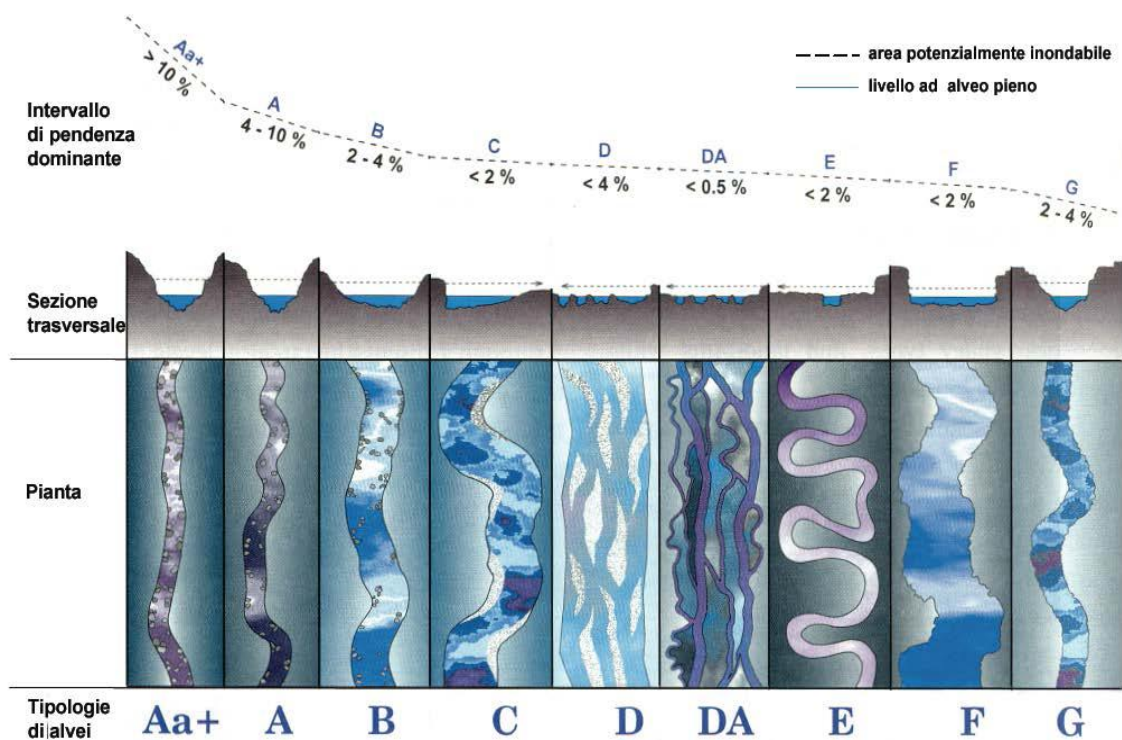


Figura13 : Classificazione delle morfologie fluviali secondo Rosgen (1994).

Nella figura 13 possiamo vedere la suddivisione degli alvei secondo Rosgen:

- 1) Pendenza dominante;
 - 2) Sezione trasversale;
 - 3) Forma planimetrica;
 - 4) Tipo di fiume.
- Aa+) A forte pendenza, profondamente confinati. A) Pendenti, confinati, con sequenze *step-pool*. B) Moderatamente confinati, con moderata pendenza, canale con *riffles* dominanti e infrequenti *pools*. C) A basso gradiente, meandriformi, con barre di meandro, sequenze *riffle-pool*, alveo alluvionale con ben definita pianura inondabile. D) A canali intrecciati con barre trasversali e longitudinali, alveo molto largo e sponde erodibili. DA) Anastomizzato con canali stretti e profondi e ben vegetata pianura inondabile. E) A basso gradiente, meandriformi con sequenze *riffle - pool*, con basso rapporto larghezza profondità e poca deposizione. F) Meandriformi confinati con sequenze *riffle - pool*, bassi gradienti, alto rapporto larghezza-profondità. G) *Gully* confinato, con sequenze *step - pool*, basso rapporto larghezza-profondità, moderati gradienti.

Passiamo ora alla classificazione dei torrenti montani ,tra le principali caratteristiche che differenziano i torrenti montani dai fiumi di pianura si possono elencare le seguenti:

- pendenze del fondo elevate;
- elevata scabrezza e ciottoli grossolani più frequenti rispetto a fiumi di pianura;
- elevata turbolenza della corrente;

- regime delle portate con forte stagionalità e con elevata variabilità spaziale e temporale;
- morfologia dei canali con alta variabilità spaziale a causa del controllo esterno della geologia, ma bassa variabilità temporale perché solo eventi di bassa frequenza o colate detritiche sono in grado di modificarne profondamente la forma.

La morfologia di torrenti montani è controllata e condizionata dalla stretta interconnessione tra processi fluviali e processi di versante. In genere esiste una rilevante alimentazione diretta di sedimenti da parte dei versanti al corso d'acqua, attraverso fenomeni franosi o alimentazione da parte di torrenti minori. La presenza di conoidi alluvionali e di corpi di frana che vanno ad occupare il fondovalle fino a sbarrare il corso d'acqua (frane di sbarramento) condiziona fortemente il trasporto solido e la morfologia di tali torrenti.

Tuttavia, in genere, la presenza di versanti a stretto ridosso del corso d'acqua e di frequenti affioramenti rocciosi sul fondo nel complesso ne limitano la mobilità sia planimetrica che altimetrica. Le forme fluviali sono, di conseguenza, meno sviluppate rispetto ai fiumi di pianura. Comunque è possibile distinguere alcune principali superfici geomorfologiche analogamente ai fiumi di pianura; In particolare, l'alveo attivo comprende il canale di magra (porzione sommersa per gran parte dell'anno), le barre non vegetate e superfici di larghezza esigua, di transizione tra barre e pianura, definite come *channelshelf*. Possono essere presenti canali secondari ai margini dell'alveo attivo o all'interno della pianura, alimentati periodicamente (solo durante piene di una certa entità) dal canale principale. La pianura inondabile è una superficie vegetata posta qualche metro al di sopra rispetto al canale di magra, mentre i terrazzi sono superfici poste a quote topografiche ancora maggiori. Le conoidi alluvionali si sviluppano in corrispondenza delle confluenze di torrenti minori ad elevato trasporto solido.

Partiamo con un primo tipo di classificazione delle morfologie di torrenti montani che è stato quello proposto da Grant *et al.* (1990) che si basa su uno schema di tipo gerarchico. Da questo punto di vista, il reticolo idrografico è scomponibile in segmenti fluviali di varia lunghezza a varie scale spaziali, più o meno omogenei relativamente alle variabili che controllano il sistema, quali geologia, idraulica e influenza dei versanti. Se si concentra l'attenzione su una sezione montana del reticolo di drenaggio, essa sarà scomponibile in tratti, cioè in segmenti del corso d'acqua separati da distinte variazioni di larghezza del fondovalle e di lunghezza dell'ordine di $10^2 - 10^3$ volte la larghezza del canale. Ogni singolo tratto sarà a sua volta suddivisibile in una serie di unità di canale ognuna delle quali di lunghezza dell'ordine di $10^1 - 10^2$ volte la larghezza del canale, all'interno di ognuna delle quali si possono a sua volta distinguere una serie di sottounità delle dimensioni di $10^{-1} - 10^0$ volte la larghezza del canale.

Alla più piccola scala spaziale, il canale è formato da singole particelle individuali.

Dove la concentrazione di queste particelle è alta e la pendenza del fondo sufficientemente elevata (superiore al 2%), la struttura del letto è dominata da una serie di *steps* composti dai blocchi di dimensioni maggiori, alternati a piccole *pools* approssimativamente lunghe da 0.4 a 0.8 volte la larghezza del canale. Presi singolarmente essi costituiscono una sottounità di canale, mentre considerati insieme, gli *steps* e le *pools* tra essi comprese creano una sequenza *step - pool* che complessivamente forma una unità (*cascade*). Le sequenze *step-pool* sono a loro volta alternate a *pools* di dimensioni maggiori, generalmente con lunghezza dell'ordine di 100-101 volte la larghezza del canale, formando quindi una sequenza di diverse unità di canale.

Grant *et al.* (1990), nella loro classificazione, distinguono 5 distinte unità di canale, di cui quattro maggiori ed una minore. Le unità maggiori sono: *pools*, *riffles*, *rapidse cascades*, e sono definite come unità morfologiche lunghe più di una volta la larghezza del canale attivo. Le unità minori sono gli *steps* ed hanno lunghezza inferiore a quella del canale. Queste unità minori andrebbero in realtà considerate, per le loro dimensioni, come sottounità, ma sono considerate unità perché costituiscono delle discontinuità importanti nel profilo longitudinale. Le *pools* e le *riffles* sono morfologie di fondo analoghe a quelle caratteristiche di fiumi ghiaiosi di pianura.

Le *pools* sono aree di corrente lenta priva di qualsiasi instabilità del pelo libero e con pochi massi esposti in condizioni di magra.

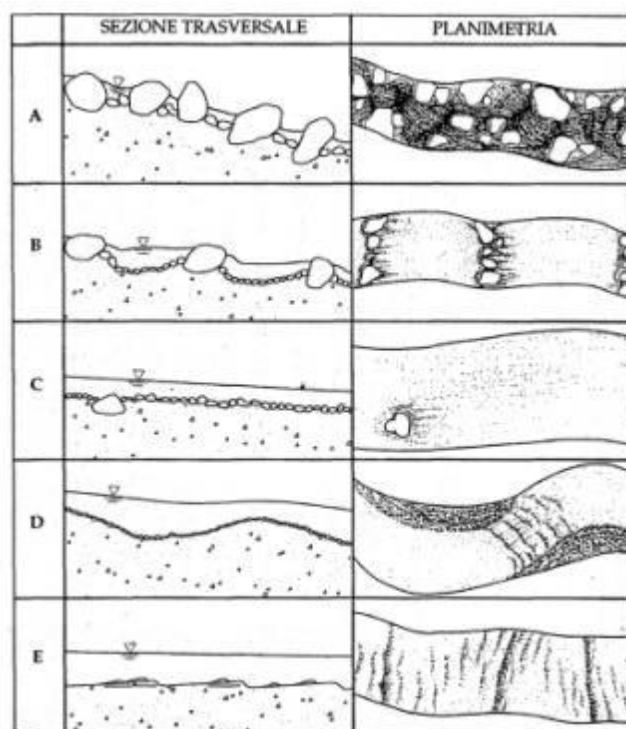
Le *riffles* sono tratti in cui la corrente è modificata da locali instabilità e piccoli salti idraulici in corrispondenza degli elementi di scabrezza del fondo.

Le *rapids* sono unità distinte dalle *riffles* per: (1) maggiore percentuale di area del corso d'acqua (15%-50%) in regime supercritico; (2) organizzazione di massi in strutture orientate più o meno perpendicolarmente al canale ed esposte in condizioni di magra.

Le *cascades* sono unità morfologiche in tratti ad elevata pendenza costituite da alternanza di *steps* e *pools*.

Infine gli *steps* possono essere presenti anche come strutture individuali (a differenza con quelli più o meno alternate alle *pools*). Possono essere di vari tipi: costituiti da affioramenti rocciosi (*rock steps*), da grossi blocchi (*bouldersteps*), o da tronchi di alberi ribaltati e disposti trasversalmente alla corrente (*log steps*).

Nel 1997 poi Montgomery & Buffington ripresero la classificazione di Grant basandosi essenzialmente sulla planimetria, sulle pendenze e sulle forme di fondo prevedendo le seguenti unità morfologiche (riferimento alla figura 14):



- Rapida (*cascade*) (A)
- *Step pool*(B)
- Letto piano (*plane bed*) (C)
- *Riffle pool*(D)
- *Dune ripple* (E)

Figura 14 : Unità morfologiche tipiche dei torrenti montani, secondo la classificazione di Montgomery & Buffington (1997):

- **Rapida** : tratto caratterizzato da una corrente a velocità sostenuta in cui il flusso presenta un'alternanza di getti in caduta, risalti idraulici (*tumbling flow*) e separazione della corrente sopra o attorno ai grossi clasti. Il susseguirsi dei getti in caduta, dei risalti idraulici e della forte turbolenza così generatasi causa una notevole dissipazione d'energia posseduta dalla corrente, favorendo così la stabilità del tratto. Questa tipologia è individuabile nei corsi d'acqua contraddistinti da una forte pendenza (7 - 20%), dalla presenza di un alveo confinato e dal materiale lapideo presente (massi e ciottoli) disposto in maniera disorganizzata. Il materiale lapideo caratterizzato da un'elevata granulometria è stabile durante i deflussi ordinari, stabilità che viene meno nel caso di deflussi non ordinari dovuti ad eventi di piena con tempo di ritorno superiore ai 50 - 100 anni. La movimentazione del materiale grossolano causa a sua volta la movimentazione del materiale più fine intrappolato prima nelle vicinanze dei massi stessi.

- **Step pool**: tratto caratterizzato da una forma di fondo a gradinata, determinata dal susseguirsi di sequenze di *step* e di *pool*. Gli *step* (gradini) sono costituiti da un insieme di massi incastrati tra loro e disposti in modo trasversale rispetto alla corrente. Tra uno *step* e l'altro si trovano le *pool* (pozze); all'interno di esse il tirante idraulico varia notevolmente, la

maggiore profondità infatti e localizzata al piede dello *step* di monte, mentre la profondità minore la si trova nella parte finale della *pool*, nelle vicinanze del successivo *step*. Questa morfologia è fortemente influenzata dall'eterogeneità granulometrica e dalla pendenza, infatti, i tratti a *step - pool* sono facilmente individuabili negli ambienti in cui il materiale d'alveo grossolano, compreso il detrito legnoso, e dello stesso ordine della larghezza del collettore, il quale possiede solitamente pendenze superiori al 3-5%. Inoltre questi tratti sono facilmente riscontrabili in alvei caratterizzati da un forte confinamento laterale, dovuto ai versanti, e da un rapporto contenuto fra larghezza e tirante. La morfologia a *step pool* viene generata solamente con piene non ordinarie, con tempo di ritorno dell'ordine di 50 - 100 anni, ciò significa che in caso di portate ordinarie questi tratti presentano una notevole stabilità. La stabilità, dal punto di vista idraulico, è ottenuta grazie allo stesso principio che permette la stabilità dei tratti a *cascade*. Nel caso degli *step - pool* si nota come il susseguirsi di gradini e pozze comporti nella corrente delle continue accelerazioni e decelerazioni, movimenti questi capaci di dissipare efficacemente l'energia della corrente stessa, limitandone il potere erosivo altrimenti presente a causa delle notevoli pendenze. Da evidenziare poi il ruolo fondamentale che possiedono le *pool*, all'interno di esse infatti il 95% dell'energia potenziale posseduta dalla corrente sopra uno *step* viene dissipata all'interno di vortici turbolenti.

- ***Plane - bed*** (letto piano): morfologia individuabile sia in ambiente montano sia in ambiente pianeggiante. Con questa tipologia non si intendono i corsi d'acqua di pianura o a scarsa pendenza, bensì i tratti aventi un profilo di fondo a pendenza uniforme. Per questo sono caratterizzati da un profilo longitudinale regolare, dall'assenza di brusche variazioni altimetriche. Mancano di barre laterali, possiedono un ridotto rapporto fra larghezza e profondità e la lunghezza del singolo tratto può arrivare anche a 10 volte la larghezza alla *bankfull*. I tratti a *plane bed* sono riscontrabili nei corsi d'acqua aventi una pendenza medio alta, indicativamente tra l'1 e il 3%. Per quanto riguarda la granulometria i tratti a letto piano sono composti da elementi diversi, si va dalla sabbia fino ai piccoli massi, con una predominanza di ghiaie e sassi. Si differenzia dalle morfologie a *cascade* e a *step pool*, oltre che per l'omogeneità del profilo longitudinale, anche per l'assenza del fenomeno di *tumblingflow*, cioè il flusso caratterizzato da un'alternanza di getti e risalti idraulici. Spesso, in ambiente montano, i tratti a *plane bed* fungono da collegamento tra due morfologie differenti.

- ***Riffle - pool***: morfologia presente soprattutto nei corsi d'acqua naturali di fondovalle e pedemontani. L'aspetto è caratterizzato da una successione ritmica di tratti a pendenza sostenuta e tirante modesto, chiamati *riffle*, con tratti a profilo quasi piatto e tiranti elevati,

chiamati *pool*. Se osservati in planimetria questi tratti presentano un flusso sinuoso della corrente, che si sposta in modo alternato da una sponda all'altra, formando estese barre laterali. I *pool* sono distanziati uno dall'altro da una lunghezza d'onda pari a 5 - 7 volte la larghezza del corso d'acqua, spaziatura questa che viene ridotta nel caso in cui il collettore sia caratterizzato da un elevato trasporto di detrito legnoso. I tratti a *riffle pool* sono localizzati in corsi d'acqua aventi una sezione trasversale poco confinata e delimitata da una piana alluvionale di discrete dimensioni. Le pendenze sono medio basse e variano tra l'1 ed il 2%. La granulometria predominante è la ghiaia, ma si può variare dalla sabbia fino ai sassi. I diametri maggiori sono localizzati nei *riffle*, dove sono depositati in maniera caotica e comunque non allineati per riuscire a formare ostacoli trasversali alla corrente. Proprio per la presenza delle granulometrie maggiori, i *riffle* rappresentano le zone in cui si formano instabilità della superficie dell'acqua, risalti idraulici, increspature e velocità superiori rispetto i *pool*.

- ***Dune - ripple***: sono tratti presenti in collettori caratterizzati da una pendenza modesta, mediamente inferiore allo 0,5%, e composti da una granulometria a sabbia prevalente. Grazie a queste condizioni si possono generare delle piccole dune o delle increspature sul fondo che generano resistenza nei confronti del flusso della corrente. La formazione di questa morfologia dipende da diversi fattori come la profondità e velocità della corrente, dalle dimensioni del materiale costituente il contorno bagnato, dal tasso di trasporto e dalla planimetria del collettore. Questa morfologia è riscontrabile anche in corsi d'acqua a fondo ghiaioso, nel caso in cui un evento non ordinario causi delle portate estreme. I tratti a *dune ripple* presentano un cosiddetto "alveo vivo" per il trasporto, quest'ultimo, infatti, avviene anche con portate liquide piuttosto basse.

Alle cinque principali morfologie definite secondo la classificazione di Montgomery & Buffington, si possono aggiungere altre morfologie: tratti colluviali, tratti in roccia e morfologie imposte.

-**Tratti colluviali**: morfologia presente nei collettori di primo o secondo ordine, che rappresentano i tratti in testata del reticolo idrografico. Si formano su depositi morenici o di falda, o comunque in generale su depositi di versante. Dal punto di vista idraulico possiedono bassi deflussi, insufficienti a movimentare la grande quantità di materiale presente in alveo che tende sempre più ad accumularsi. Il trasporto solido avviene solo in modo intermittente ed impulsivo essendo notevolmente influenzato dalla presenza di detrito legnoso, grossi massi, gradini in roccia e vegetazione in alveo che contribuiscono a ridurre l'energia disponibile.

Nei tratti colluviali non è difficile imbattersi in fenomeni quali le colate detritiche, questi sono gli unici eventi capaci di movimentare verso valle il materiale.

Alcuni studi hanno appurato che il sedimento accumulato in collettori di primo e secondo ordine è movimentabile da colate detritiche ogni 300 - 500 anni.

- **Tratti in roccia:** caratterizzati dall'assenza, in modo continuo, di sedimento in alveo.

L'assenza di sedimento è in primo luogo da attribuire all'elevata pendenza del collettore accompagnata spesso da un elevato tirante che ne aumenta la capacità di trasporto.

Possibile la presenza di limitato materiale in corrispondenza di buche o a valle di ostruzioni.

Questa morfologia è incassata nelle pareti della valle e per questo difficilmente può variare il suo andamento planimetrico.

- **Tratti a morfologia imposta:** morfologia dovuta alla presenza di ostruzioni che modificano la geometria originaria del tratto. Il caso più frequente avviene nelle regioni boscate dove il detrito legnoso caduto in alveo, a seconda delle dimensioni, può causare locali escavazioni, divergenze del flusso ed accumuli di detrito che favoriscono a loro volta la formazione di *pool*, barre e *step*. Le due morfologie imposte più diffuse sono il *riffle pool* e lo *step pool*; il primo si può formare a causa dell'ostruzione prodotta da materiale vegetale vario, mentre il secondo si genera in seguito all'immissione in alveo di piante di grosse dimensioni che vanno a posizionarsi trasversalmente al flusso della corrente (*log step*), formando veri e propri gradini (*step*).

Nel 2000 a partire dalla classificazione proposta da Montgomery & Buffington (1997), Lenzi *et al* (2000) hanno introdotto una serie di integrazioni, in modo da prevedere una gamma più articolata di tipologie morfologiche che si possono riscontrare nei torrenti alpini e tenere conto, nello stesso tempo, dei condizionamenti esterni più frequenti. Questi si sovrappongono alla morfologia di base e possono anche dare luogo a delle morfologie imposte. A tal fine è stata messa a punto una scheda di rilevamento, nella quale trovano spazio, oltre alle indicazioni sul tipo di unità morfologica, anche le informazioni concernenti gli eventuali condizionamenti, la forma della sezione trasversale della valle e la granulometria dominante del letto.

In particolare, le configurazioni morfologiche previste da Lenzi *et al.* (2000) sono le seguenti:

- 1) Rapida (*cascade*) (suddivisibile in rapida a scivolo o a gradini);
- 2) *Step pool*;
- 3) *Riffle pool*;
- 4) Letto piano;
- 5) *Riffle-step pool*;
- 6) *Transverserib*;
- 7) Cascata;
- 8) Tratti a barre e raggruppamenti;
- 9) Tratto deposizionale;
- 10) Tratto inciso;
- 11) Dune *ripple*;
- 12) *Pool* isolata;
- 13) Tratto meandriforme;
- 14) Tratto sistemato;
- 15) Tratto colluviale.

TIPOLOGIA DEI TRATTI

Numero tratto

a gradini sequenza
RAPIDA **STEP POOL** isolato POOL ISOLATA LOG STEP RIFFLE-STEP POOL sequenza
 a scivolo

RIFFLE POOL TRANSVERSE RIB CASCATE LETTO PIANO TRATTO SISTEMATO

TRATTO DEPOSIZIONALE A BARRE E RAGGRUPPAMENTI laterali
 TRATTO INCISO COLLUVIALE mediani DUNE RIPPLE
 MEANDRIFORME

CONDIZIONAMENTI

in alveo in alveo in alveo in alveo
Massi **Affioramenti rocciosi** **Vegetazione** **Legname**
 sulle sponde sulle sponde sulle sponde sulle sponde

Frana Immissione di collettori Colata detritica

Forma della valle

Granulometria dominante

	alveo	sponde
argilla-limo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
sabbie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ghiaie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ciottoli	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
massi	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Note:

- lunghezza del tratto:.....

- pendenza:.....

- larghezza al bankfull:.....

- osservazioni:.....

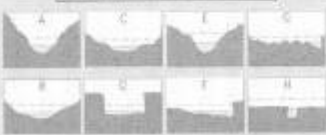


Figura 15: Scheda di rilevamento delle unità morfologiche nei torrenti alpini (da LENZI *et al.*, 2000).

Ecco riportate le nuove tipologie previste da Lenzi *et al.* (2000)

1) **Rapide a scivolo o a gradini.** Le prime sono caratterizzate da macroscabrezze ben distribuite all'interno del canale, mentre le seconde presentano al loro interno un parziale grado di organizzazione trasversale degli elementi lapidei.

5) **Riffle - step pool.** Si tratta di unità morfologiche composte da un gradino costituito da un insieme di sedimenti di larghezza superiore alla media e con un profilo disteso verso valle. Una riffle - step si configura, quindi, come una rampa molto corta alla quale segue una pool.

6) **Transverserib.** Sono costituiti dall'allineamento di ciottoli disposti in modo trasversale rispetto alla direzione della corrente ed elevati verticalmente rispetto alla quota di base del letto. L'elemento diagnostico che permette la distinzione tra i transverserib e gli step è la mancanza di interrimento a monte del gradino.

7) **Cascata.** Le cascate sono dei salti più o meno verticali, in genere isolati e di altezza superiore ai 3 metri.

8) **Tratti a barre e raggruppamenti(o cluster).** Si distinguono dai tratti a riffle pool per una maggiore irregolarità delle barre e dalle rapide per una minore pendenza e una ridotta presenza di fenomeni di flusso a getto (*jet and wake flow*). Le barre possono essere mediane o

lateral, ma non risultano così estese come quelle che si possono riscontrare nei tratti deposizionali.

9) **Tratto deposizionale.** I tratti deposizionali si localizzano generalmente in corrispondenza di allargamenti dell'alveo, dove la pendenza di fondo del corso d'acqua è nettamente inferiore rispetto ai contigui tratti di monte e di valle.

Morfologicamente questi tratti possono avere una struttura caotica, con depositi di materiale anche molto consistenti e talora consolidati dalla vegetazione.

10) **Tratto inciso.** Nei tratti incisi il processo dominante è completamente opposto a quello dei tratti deposizionali: la capacità di rimozione e trasporto dei sedimenti prende il sopravvento sulla alimentazione solida da monte, dando luogo ad un approfondimento della valle.

13) **Tratto meandriforme.** I tratti meandriforme si sviluppano prevalentemente sulla testata dei bacini, in aree in cui la valle si allarga notevolmente ed il torrente scorre su una pianura alluvionale morfologicamente evoluta. Il tracciato planimetrico mostra delle anse che si susseguono in modo discontinuo e irregolare. A differenza dei tratti meandriforme caratteristici dei corsi d'acqua di pianura, la sinuosità di quelli montani è generalmente bassa (compresa tra 1.5 e 2).

14) **Tratto sistemato.** Sono tratti in cui sono stati realizzati degli interventi di sistemazione più o meno intensi

2.3 -Le portate formative

A causa dell'estrema variabilità dei livelli idrometrici e delle corrispondenti portate in una singola sezione di un corso d'acqua naturale, è nata l'esigenza di definire un livello (e/o una corrispondente portata) che fosse il valore più rappresentativo della forma e delle dimensioni dell'alveo. Nasce il concetto di livello ad alveo pieno (*bankfull stage*) alcuni autori italiani utilizzano anche i termini "piene rive" o "ripe piene") e corrispondente portata ad alveo pieno (*bankfull discharge*). Secondo la definizione originaria proposta da Leopold *et al.* (1964), la portata ad alveo pieno rappresenta la "massima portata che può essere contenuta all'interno dell'alveo senza che superi le sponde" ed il livello ad alveo pieno rappresenta il corrispondente livello idrometrico. Tenendo presente che le prime definizioni di portata ad alveo pieno (così come degli altri concetti di geometria idraulica) sono riferite quasi sempre ad alvei naturali stabili (in equilibrio dinamico), ne deriva che la superficie che cominciava ad

essere inondata qualora la portata non contenuta all'interno dell'alveo superava le sponde coincideva proprio con la cosiddetta pianura inondabile (*floodplain*). Pertanto il livello ad alveo pieno si veniva ad identificare con la quota della pianura inondabile "attiva" o "moderna" (*active or modern floodplain*), cioè della superficie pianeggiante formata dal corso d'acqua nelle presenti condizioni di regime (a differenza del terrazzo che corrisponde ad una piana inondabile "inattiva"). È comunemente accettato in letteratura che la portata ad alveo pieno si verifica normalmente con moderata frequenza, essendo questa compresa tra 1 e 3 anni (Q1.5, Q2, Q2.33). Esistono alcune implicazioni fisiche legate al livello ad alveo pieno, in quanto esso rappresenta un'importante discontinuità nell'efficacia dei processi fluviali, in particolare: a) segna il passaggio da processi prevalenti di trasporto solido in alveo a processi di tracimazione; b) durante le esondazioni, una parte della corrente si muove sulla piana inondabile e non influenza direttamente le dimensioni dell'alveo.

L'identificazione sul terreno del livello ad alveo pieno non è sempre semplice. Tra i casi più problematici è quello in cui l'alveo si è recentemente inciso o è tuttora in incisione, in quanto in tal caso può esserci una mancanza di forme deposizionali (in particolare di una nuova piana inondabile) e perché la dimensione stessa dell'alveo varia nel tempo. In assenza di una nuova piana inondabile costruitasi dopo la fase di incisione, la portata ad alveo pieno va ad identificarsi con la massima portata contenuta in alveo, a partire dalla quale la corrente inizia ad inondare un terrazzo. In questi casi, la portata ad alveo pieno può essere associata a tempi di ritorno anche ben superiori di 3 anni e non ha alcuna corrispondenza con la portata formativa (o dominante) del corso d'acqua (Shields *et al.*, 2003; Simon & Castro, 2003; Simon *et al.*, 2004).

Associato al concetto di portata ad alveo pieno è quello di portata formativa (*channel-forming discharge*) o portata dominante (*dominant discharge*). La definizione di tali portate risale alle prime applicazioni della teoria del regime ad alvei naturali, quando si è posta la questione di definire un singolo valore di portata liquida che, se fosse idealmente sostituito all'intero regime delle portate per uno stesso periodo di tempo, produrrebbe la stessa forma e le stesse caratteristiche geometriche dell'alveo (Inglis, 1949). Una definizione più robusta e fisicamente basata è quella fornita da Wolman & Miller (1960), i quali impostarono il problema in termini di prodotto tra magnitudo e frequenza delle portate liquide. Secondo tale schema, le portate più efficaci nel modellare l'alveo non sono né quelle relativamente basse (le quali, anche se molto frequenti, sono in grado di trasportare solo modeste quantità di sedimenti), né quelle estreme (le quali, seppure associate ad elevato trasporto solido, sono troppo infrequenti), bensì una portata associata a condizioni intermedie, alla quale corrisponde

il massimo valore del prodotto tra la curva di frequenza delle portate liquide e le corrispondenti portate solide. Andrews (1980) ha fornito una conferma sperimentale a quanto originariamente proposto da Wolman & Miller (1960). È stato così introdotto anche il termine di portata efficace (*effective discharge*) per indicare appunto la portata che trasporta più sedimenti in un certo intervallo temporale. Dato che la frequenza associata alla portata efficace (tempi di ritorno tra 1 e 3 anni) è la stessa di quella che caratterizza la portata ad alveo pieno, le due portate spesso possono essere identificate, almeno in alvei in equilibrio dinamico.

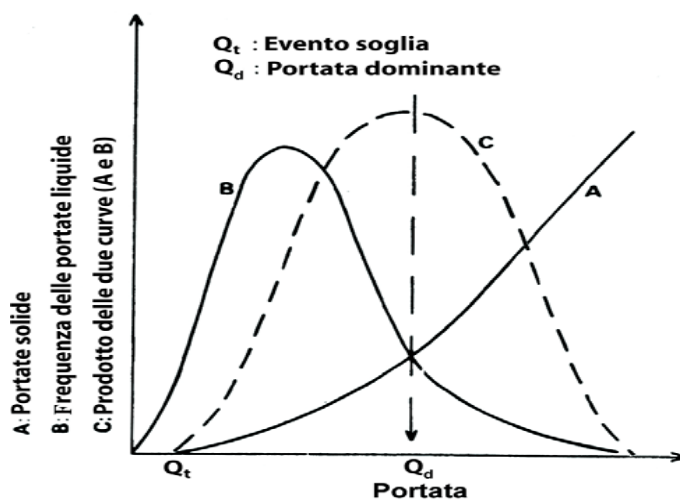


Figura 16 : Concetto di portata dominante o efficace secondo Wolman & Miller (1960).

Riepilogando, la portata formativa (*channel forming discharge*) e la portata dominante (*dominant discharge*) possono essere considerati equivalenti, e sono da intendere come quel valore teorico di portata che ha maggiori effetti sulla forma e sulle dimensioni dell'alveo, mentre esistono tre possibili approcci per determinare tale portata "teorica" (Biedenharn *et al.*, 2001):

- (1) Portata ad alveo pieno (*bankfull discharge*);
- (2) Portata con tempo di ritorno compreso tra 1 e 3 anni (il valore della portata con tempi di ritorno di 1.5 ÷ 2 anni è quello più comunemente usato);
- (3) Portata efficace (*effective discharge*), intesa come portata che trasporta più sedimenti in un intervallo temporale sufficientemente ampio.

Idealmente, il metodo usato per determinare la portata dominante o formativa dovrebbe avere applicabilità generale e dovrebbe essere basato sulla quantificazione dei processi responsabili della forma e delle dimensioni dell'alveo. Solo il terzo dei tre possibili approcci (portata

efficace) soddisfa questi requisiti; vanno tuttavia riconosciuti alcuni limiti, soprattutto legati al fatto che tale metodo richiede dati di trasporto solido difficilmente disponibili. Gli stessi Biedenharn *et al.* (2001) concludono che è raccomandabile usare tutti e tre i metodi ed alla fine confrontarli per ridurre le incertezze del risultato finale, così come è più opportuno considerare un *range* di portate, piuttosto che un singolo valore, che hanno maggiori effetti sulla forma dell'alveo.

Si ricorda che, nel caso di alvei instabili, la portata dominante calcolata come portata efficace può differire notevolmente dalla portata ad alveo pieno e dalla portata con tempi di ritorno di 1.5 ÷ 2 anni. In particolare, nel caso di un alveo che sta incidendo, la portata contenuta nell'alveo aumenta, la frequenza di inondazione della piana inondabile decresce progressivamente e quest'ultima diventa un terrazzo. Ciò ha importanti implicazioni in termini di efficacia di eventi con tempi di ritorno da moderati ad alti che precedentemente avrebbero dissipato la loro energia nella piana inondabile mentre ora trasportano molti più sedimenti rispetto alla stessa portata prima dell'incisione (Simon, 1992; Simon & Darby, 1997, 1999). La portata efficace ricavata dall'analisi magnitudo-frequenza in un alveo soggetto ad incisione può essere quindi molto differente rispetto al caso di un corso d'acqua stabile, pertanto la sua corrispondenza con la portata ad alveo pieno non è giustificabile.

Infine, si ricorda che nel caso di alvei con morfologie a canali intrecciati o transizionali (*wandering*), il livello ad alveo pieno presenta maggiori difficoltà di identificazione, così come è discutibile il concetto stesso di portata dominante. In queste morfologie si preferisce più spesso l'idea che esistano differenti valori di portata che hanno effetti sulla forma complessiva dell'alveo (ad es., una portata più bassa che modella il canale principale e le barre più attive, una più elevata che modella i canali secondari, le barre più alte e le isole) (Surian *et al.*, 2009d). Molto complessa è anche la stima in campo del livello di alveo pieno in torrenti montani, i quali spesso non presentano una piana inondabile (Lenzi *et al.*, 2000). Anche per tali corsi d'acqua è stato recentemente ipotizzato che non si possa identificare un solo valore o *range* di portata efficace/dominante, bensì almeno due intervalli associati ad eventi di piena ordinaria e straordinaria (Lenzi *et al.*, 2006).

2.4 - Mobilità laterale ed erosione delle sponde

I processi di erosione delle sponde fluviali sono quelli che determinano la mobilità planimetrica (laterale) del corso d'acqua e sono processi chiave per l'evoluzione morfologica dell'alveo, della piana inondabile e degli habitat ripariali ad essi associati. L'arretramento di una singola sponda può avvenire attraverso la combinazione di una larga varietà di processi, tra i quali è possibile distinguere le seguenti tre categorie (Thorne, 1982; Rinaldi & Dapporto, 2005): (1) processi di degradazione meteorica e di indebolimento; (2) processi di erosione; (3) movimenti di massa. I primi sono processi prevalentemente subaerei (disseccamento, gelo/disgelo, dilavamento, calpestio, danni meccanici, distruzione della vegetazione, pressioni interstiziali positive), che agiscono sulla superficie o all'interno della sponda e ne comportano un progressivo indebolimento piuttosto che un effettivo arretramento. I processi di erosione determinano rimozione e trasporto di particelle o aggregati dalla superficie esterna della sponda (erosione fluviale per corrente parallela o incidente, erosione per rigagnoli e fossi, sifonamento, onde generate dal vento o da imbarcazioni). Infine i movimenti di massa comprendono vari meccanismi attraverso i quali si verifica una rottura ed un movimento del materiale di sponda ad opera della gravità (scivolamenti, ribaltamenti, crolli, colate). L'interazione tra i vari processi determina l'evoluzione su una più lunga scala temporale della sponda e dipende principalmente dal bilancio tra processi di alimentazione e di rimozione dei sedimenti, secondo il meccanismo noto come controllo del punto basale (*basalend point control*: Thorne, 1982).

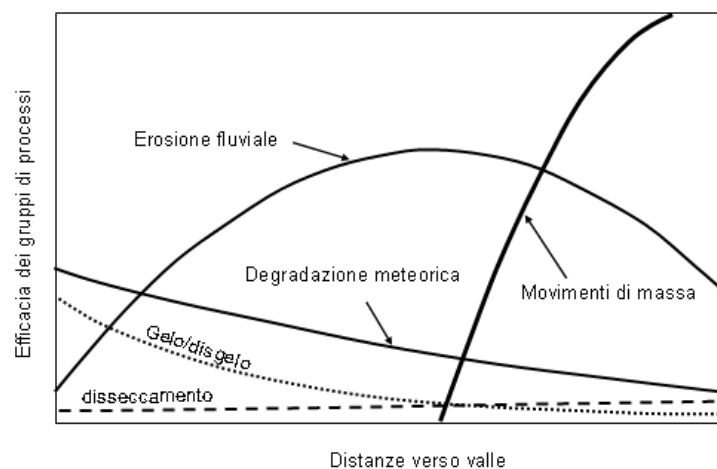


Figura 17 :Modello concettuale dei processi dominanti di arretramento di sponde fluviali in un sistema fluviale. (Modificato da Lawler, 1992 e da Rinaldi & Darby, 2008).

Secondo tale concetto, si possono schematicamente distinguere tre situazioni: a) condizioni di accumulo, quando i movimenti di massa apportano materiale alla base della sponda con un tasso superiore rispetto al tasso di rimozione; b) condizione di equilibrio, quando i processi di apporto e rimozione si bilanciano tra di loro; c) condizioni di erosione, quando l'erosione è tale da comportare una rimozione completa del detrito alla base della sponda ed è inoltre in grado di produrre un abbassamento del fondo.

Per quanto riguarda l'importanza relativa dei vari processi nel determinare l'arretramento delle sponde, Lawler (1992) ha proposto un modello concettuale che ipotizza una zonazione spaziale all'interno di uno stesso sistema fluviale dei tre gruppi di processi:

(1) nella porzione alta del bacino, i processi subaerei (degradazione meteorica) sono i più importanti;

(2) lungo la parte intermedia del corso d'acqua, la potenza della corrente presenta i suoi valori massimi e l'erosione fluviale può diventare il processo dominante;

(3) nella parte bassa, la potenza della corrente diminuisce (a causa del ridursi delle pendenze) mentre le sponde diventano sensibilmente più alte, pertanto i movimenti di massa diventano la categoria di processi dominanti. L'instabilità laterale ed i tassi di arretramento sono estremamente variabili sia nello spazio (da fiume a fiume o da monte verso valle, all'interno dello stesso sistema fluviale) che nel tempo (a scala del singolo evento di piena, stagionale e pluriennale) e sono pertanto difficili da prevedere. I fattori che influenzano l'instabilità laterale in senso longitudinale (da monte verso valle) in un sistema fluviale possono variare sensibilmente a seconda della scala spaziale considerata. Alla scala dell'intero sistema fluviale, in prima approssimazione la distribuzione dell'instabilità laterale può essere legata all'interazione tra potenza della corrente e resistenza del materiale che costituisce le sponde. Nei tratti confinati della porzione medio - alta del bacino, seppure la potenza della corrente può raggiungere un valore massimo, la resistenza dei versanti annulla o limita la tendenza all'erosione laterale, mentre un aumento brusco dell'instabilità si verifica al passaggio del corso d'acqua nei tratti semiconfinati o non confinati (ad esempio sui conoidi allo sbocco in pianura). Alla scala di tratto, diventano più importanti fattori quali la composizione della sponda e la vegetazione presente, le tensioni tangenziali, a loro volta condizionate dalla geometria dell'alveo (curvatura e larghezza), dal trasporto solido al fondo e dalle forme deposizionali associate (barre), le quali possono forzare la corrente ad agire in particolari punti. Alla scala del singolo profilo di sponda, possono diventare importanti fattori locali quali la tensione tangenziale lungo sponda, le pressioni interstiziali, le proprietà dei materiali

che costituiscono la sponda (parametri di erodibilità e di resistenza al taglio), la stessa forma dell'idrogramma di piena (Rinaldi & Darby, 2008; Rinaldi *et al.*, 2004, 2008; Luppi *et al.*, 2009).

Considerando i fenomeni di instabilità in senso temporale, il loro innescarsi o accentuarsi può essere strettamente legato alle tendenze evolutive del corso d'acqua o del sistema fluviale, ad esempio a causa di un abbassamento del fondo (si veda il paragrafo successivo) o a causa di una variazione di morfologia fluviale (ad es., da un alveo a canali intrecciati ad un meandriforme o viceversa). In tutti i casi, un approccio basato sulla ricostruzione dei tracciati dell'alveo nelle ultime decine di anni è fondamentale per delimitare la fascia dove il corso d'acqua potrebbe avere possibilità di divagare nei prossimi decenni (fascia erodibile o fascia di mobilità funzionale).

2.5 - Variazioni morfologiche dei corsi d'acqua italiani

Nel corso degli ultimi 200 anni, ed in particolar modo negli ultimi 50 - 60 anni, la morfologia e la dinamica della maggior parte dei fiumi europei ed italiani hanno subito delle profonde trasformazioni, soprattutto a causa di vari interventi antropici sia a scala di bacino che di collettore andando a modificare quello che è il naturale flusso delle acque e dei sedimenti. Esso è stato ostacolato dalla costruzione di dighe per la generazione di energia elettrica, dal prelievo di sedimenti dagli alvei a scopi edili che di conseguenza hanno portato ad una variazione dell'uso del suolo a scopi costruttivi ed agricoli e dalle derivazioni d'acqua per scopi agricoli. Tali interventi hanno infatti modificato il regime delle portate liquide e di quelle solide, oltre ad aver condizionato altri aspetti, come ad esempio la mobilità laterale, fondamentali nella dinamica di un alveo fluviale. L'entità delle variazioni subite dagli alvei è stata considerevole, in quanto in molti casi ha comportato una vera e propria trasformazione morfologica, ossia una modificazione della configurazione planimetrica (ad esempio da un alveo a canali intrecciati ad un alveo di tipo *wandering* o, addirittura, a canale singolo).

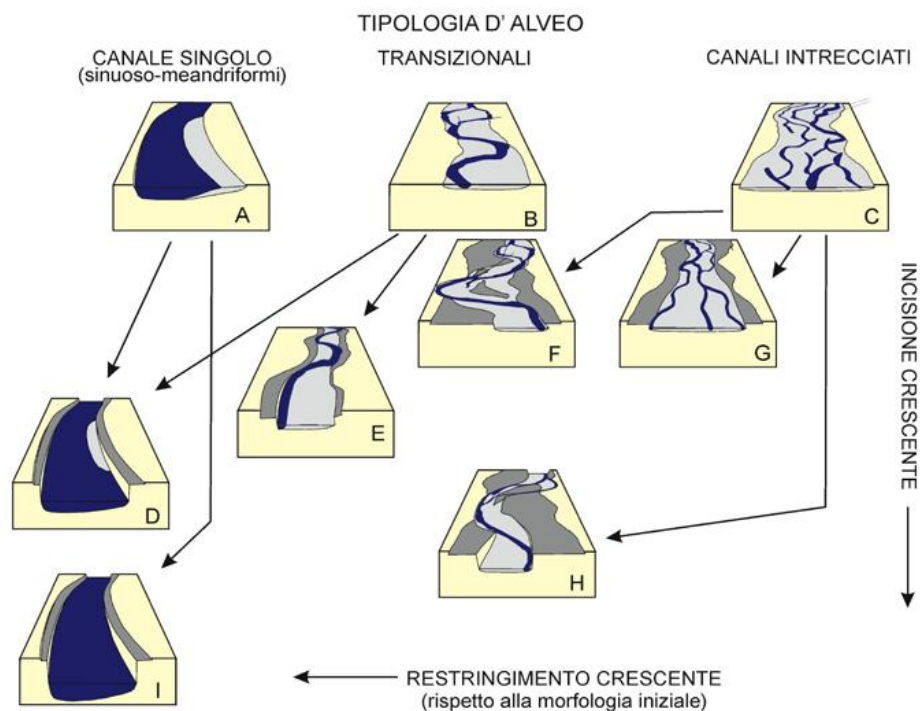


Figura 18: Schema di classificazione delle variazioni morfologiche di fiumi italiani.

(Da Surian & Rinaldi, 2003, modificato).

I processi più diffusi sono stati il restringimento e l'incisione dell'alveo. La larghezza dell'alveo ha subito generalmente una riduzione superiore al 50%, fino a valori dell' 85 ÷ 90%, mentre l'abbassamento del fondo è stato dell'ordine di alcuni metri ma, localmente, anche di 10 ÷ 12 m (Surian & Rinaldi, 2003; Surian *et al.*, 2009a).

Tali processi dovuti prima alla fase di ricostruzione quindi al boom agricolo e poi a quello industriale - edile si sono manifestati in alcuni corsi d'acqua a partire dal XIX secolo, ma sono stati più intensi per un periodo relativamente breve, ossia tra gli anni 50 e gli anni 80 – 90 del secolo scorso. Le cause di variazioni così intense nella morfologia degli alvei quindi sono state individuate nel prelievo di sedimenti dagli alvei, generalmente il fattore più rilevante, nella costruzione di dighe, in vari interventi di canalizzazione, in variazioni di uso del suolo a scala di bacino (in particolare l'aumento della copertura boschiva) e nelle sistemazioni idraulico - forestali.

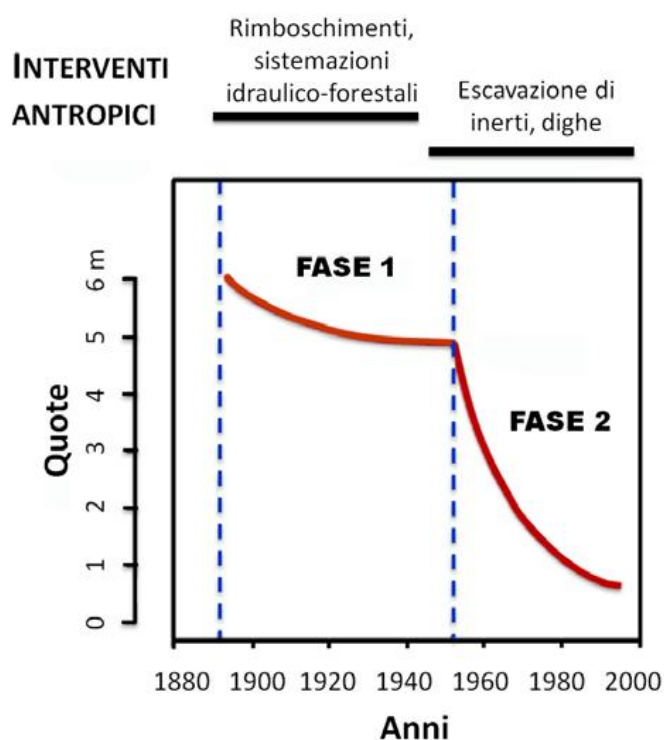


Figura 19 : Tipico andamento temporale della quota del fondo in risposta a disturbi antropici durante gli ultimi 100 anni circa osservato per vari fiumi italiani.

(Da Surian & Rinaldi, 2004)

Le ricerche più recenti (Surian & Rinaldi, 2004; Rinaldi *Et al.*, 2005; Surian, 2006; Rinaldi & Simoncini, 2006; Surian & Cisotto, 2007, Surian *Et al.*, 2009) dimostrano per fortuna una

maggior sensibilità dovuta alla corrente legislazione che regola le lavorazioni in alveo e stanno evidenziando in alcuni corsi d'acqua una fase di parziale recupero morfologico (riallargamento e stabilità del fondo o in alcuni casi sedimentazione), cominciata generalmente nei primi anni '90. Tuttavia, a differenza della precedente fase principale di aggiustamento, che ha comportato il restringimento e l'incisione degli alvei, questa fase più recente non è ancora così ben documentata e generalizzata come la precedente. In tutti i casi tali processi non hanno comunque "compensato" le variazioni indotte dalla fase precedente. Dovremmo attendere ancora vari anni per verificare la vera e propria fase di recupero e su alcuni corsi d'acqua fortemente colpiti dalla costruzione di grandi opere di barriera si faticherà molto il riscontro.

Il concetto di fondo della mia tesi cerca di spiegare queste modificazioni riguarda un'analisi statistica per verificare se certe variabili morfologiche (variazioni planimetriche, cambi d'uso del suolo, ecc) sono correlate (ovvero dipendono), da variabili idrologiche (piene).

CAPITOLO 3

PARAMETRI IDROLOGICI DEI CORSI D'ACQUA

Nell'ambito dello studio fluviale ci vengono in aiuto dal punto di vista idrologico alcune documentazioni, per esempio le serie storiche delle scale delle portate e dei livelli idrometrici, misurati con diversi strumenti nell'ambito del fiume di nostro interesse che verranno poi analizzati statisticamente.

3.1 - Misura e registro delle portate

Con il termine di deflusso superficiale indichiamo la portata d'acqua o la quantità d'acqua che in un certo istante defluisce in una data sezione dell'alveo del corso d'acqua (in genere è la sezione di chiusura di un bacino).

La misura dei deflussi dei corsi d'acqua non si possono misurare direttamente, raccogliendo l'acqua che attraversa la sezione in un dato intervallo di tempo, per motivi ben evidenti. Solo nel caso di piccoli corsi d'acqua o sorgenti si possono eseguire misure di questo tipo, che si è visto, rappresentano l'esatto corrispondente delle misure di pioggia.

Le misure delle portate nelle sezioni dei corsi d'acqua vengono perciò effettuate specialmente in modo indiretto cioè tramite l'utilizzo di vari strumenti e diverse misure da rapportare fra loro. In una data sezione del corso d'acqua si misura, infatti, l'altezza idrometrica o livello idrometrico che rappresenta il livello del pelo libero dell'acqua misurato rispetto al fondo dell'alveo o ad una quota nota detta zero idrometrico e si ricava la portata per mezzo di diagrammi costruiti appositamente per ciascuna sezione, che vengono definiti scala delle portate.

La scala delle portate è una curva, riportata in un diagramma, avente in ascissa i valori di portata Q e nell'asse delle ordinate le corrispondenti altezze idrometriche h , quindi basta avere le misurazioni di quest'ultime per ottenere immediatamente dalla scala delle portate, il valore di portata corrispondente.

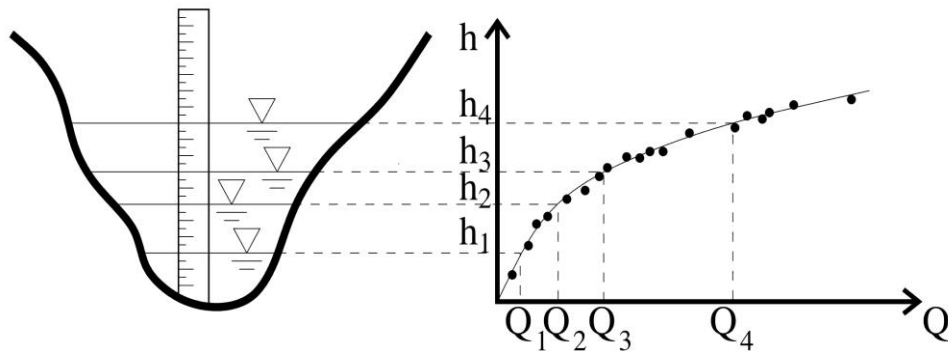


Figura 20: Esempio di scala delle portate da Rinaldi

Da notare però che non sempre la relazione portate - altezze idrometriche è biunivoca. Essa può essere influenzata dalla presenza di rigurgiti e “richiami”(sbalzi) e dalle condizioni di moto non uniforme; Inoltre la conformazione dell’alveo e del corso d’acqua possono cambiare nel tempo quindi varierà anche la scala delle portate. Essa perciò deve essere ricavata con apposite misure per ciascuna sezione di misura e relativo idrometro.

Solo in pochi casi si può ricavare la portata analiticamente con le equazioni di idraulica; in genere si occorre al ricavarla sperimentalmente attraverso altre misure dirette di portata, di solito tramite l’analisi delle correnti o con strumenti ad ultrasuoni. Esse però sono decisamente onerose e richiedono un notevole utilizzo di strumenti e di persone. Per questo si opta sempre per le misure indirette .

Lo strumento per la misura del livello dell’acqua o altezza idrometrica nei fiumi e nei laghi si chiama idrometro.

La sezione in cui si installa l’idrometro deve essere stabile per non perdere la consistenza della scala delle portate e non deve mai essere posto a monte di un tratto di alveo in cui si manifestano cambiamenti particolarmente consistenti che andrebbero ad influenzare il livello d’acqua e la sezione. Per questo per una maggiore precisione delle misure è bene scegliere una sezione abbastanza stabile.

E’ necessario anche riparare dalla corrente gli idrometri ma anche gli idrometrografi con opportune installazioni sia per evitare le eventuali onde che si producono nel canale, sia per proteggerli dagli eventi di piena.

Le altezze idrometriche sono misurate rispetto allo zero idrometrico, una quota prestabilita di cui si conserva la posizione rispetto a dei capisaldi topografici posti al sicuro dalle piene nel

caso in cui gli apparecchi vengano travolti da un evento di piena si possa provvedere alla sostituzione senza dover determinare di nuovo la scala delle portate.

Gli idrometri più semplici sono delle aste graduate su cui si possono misurare le altezze idrometriche a partire da zero idrometrico fisso. Convenzionalmente ad un ora prestabilita (in Italia a mezzogiorno) un operatore legge l'altezza sull'asta idrometrica e la riporta in un registro.



Figura 21 (sopra) : Esempio di Asta idrometrica

Figura 22 (a destra) : Relativa stazione idrometrica presso il fiume Posina a Stancari (VI).



Per ovviare al problema di un operatore che si rechi in loco ad effettuare la lettura sono stati inventati gli idrometrografi che sono degli idrometri registratori, sono costituiti da un galleggiante collegato ad una puleggia a sua volta collegata ad un pennino che scrive su un nastro. Con essi oltre ad una lettura riferita a qualsiasi momento della giornata possiamo misurare anche il picco di piena. Oggi viene tutto registrato direttamente su memoria digitale. Un altro passo avanti nella tecnologia riguarda gli idrometri ad ultrasuoni che misurano l'altezza sulla base del tempo impiegato dagli ultrasuoni nel percorso dall'apparecchio al pelo libero e viceversa.

Passiamo ora alla determinazione della scala delle portate che è la parte più delicata nelle misure delle Portate perché le imprecisioni commesse nella costruzione di questo diagramma comporterebbe un errore nella misura delle portate.

Quindi andiamo utilizzando delle equazioni di idraulica basate su livelli idrometrici e su delle costanti a trovarci il nostro diagramma delle portate interpolando proprio le misure di portata ed i livelli idrometrici.

Le misure per la determinazione della scala delle portate deve essere aggiornata regolarmente per seguire l'evoluzione naturale dell'alveo.

Nei casi in cui non riuscissimo a calcolarci la scala delle portate per motivi legati alle caratteristiche poco regolari del tratto o del bacino in generale si utilizzano le misure dirette di portata oppure basandosi solamente sulle informazioni pluviometriche.

Le informazioni pluviometriche aiutano lo studio degli eventi di piena ma vengono utilizzati anche per numerosi scopi pratici legati all'idraulica e all'ingegneria e ci possono aiutare nel calcolo dell'intensità di precipitazione o della precipitazione che interessa un assegnato bacino idrografico e quindi la portata.

Anche essi si quantificano tramite strumenti detti pluviometri o pluviografi che vengono letti almeno una volta al giorno e ci danno l'altezza di precipitazione in un determinato intervallo di tempo. Questi strumenti di misura come gli idrometri vanno tarati, controllati ed aggiornati regolarmente ed installati con sapienza e serietà in punti sufficientemente riparati.

3.2 - Analisi statistica delle portate

I processi idrologici evolvono nello spazio e nel tempo secondo modalità che sono in parte prescindibili ed in parte casuali in quanto non dettagliatamente descritte dalle leggi fisiche in nostro possesso.

I sistemi idrologici sono talvolta investiti da eventi di estremi come le precipitazioni, le piene o la siccità ; La magnitudo di un evento estremo è inversamente proporzionale alla sua frequenza di accadimento ovvero eventi molto severi accadono meno frequentemente di eventi di moderata intensità.

L'obbiettivo dell'analisi statistica di dati idrologici è collegare la magnitudo degli eventi estremi alla loro frequenza di accadimento tramite l'impiego di distribuzioni di probabilità.

I dati idrologici utilizzati a tale scopo sono assunti essere indipendenti e identicamente distribuiti. In pratica che ogni valore sia preso in condizioni tali da non mostrare errori significativi anche se sono indipendenti uno dall'altro.

La statistica fornisce metodi per inferire le proprietà di una popolazione sulla base di quelle di un campione, a tale popolazione appartenente. Oltre alla semplice descrizione della

popolazione, essa offre informazioni sull'incertezza relativa alla conoscenza della popolazione acquisita tramite il campione. La statistica pertanto consente di valutare il valore di un dato, misurato in termini di decrescita dell'incertezza. Valutare le incertezze è pertanto fondamentale per indirizzare gli sforzi di acquisizione di ulteriori dati.

Il concetto fondamentale in statistica è rappresentato dalla popolazione, ovvero dalla collezione completa di eventi di cui ci interessa valutarne le proprietà. Un esempio di popolazione può essere la portata o meglio tutte i dati possibili relativi alla portata che si possono verificare lungo un corso d'acqua.

Gli strumenti della statistica consentono quindi di sviluppare metodologie per l'efficiente raccolta dei dati, cercare di individuare un metodo per descrivere sinteticamente i dati raccolti, cercare di fornire una interpretazione dei dati e trarre infine delle conclusioni sulla base dei dati presi in considerazione.

Il processo di influenza statistica consente di identificare le proprietà statistiche della popolazione a partire da un campione. La funzione di probabilità così identificata consente di specificare la probabilità che un generico valore venga o non venga superato.

La probabilità deve soddisfare una serie di principi: la probabilità di un evento è un numero compreso fra 0 e 1, la probabilità di un evento certo è 1, la probabilità di un evento ottenuto come la somma di due eventi che si escludono reciprocamente è pari alla somma delle probabilità di due eventi.

Il concetto di probabilità di non superamento associata ad un certo evento idrologico è spesso sostituito, per ragioni di comodità di rappresentazione da quello di tempo di ritorno.

In realtà il concetto di tempo di ritorno può essere introdotto senza far ricorso alla probabilità perché esso è il numero di anni che in media separa il verificarsi di due eventi di intensità eguale o superiore a quella assegnata cioè il numero di anni in cui l'evento viene eguagliato o superato in media una volta. Capiamo che la parola chiave nella definizione di tempo di ritorno è media; questo termine implica comunque che la probabilità di superamento di un certo evento di piena è $1/T$ per ciascun anno indipendentemente dal verificarsi di un evento simile nell'anno precedente o in anni recenti.

Con la statistica riusciamo a capire quale probabilità c'è che un evento T - ennale si verifichi almeno una volta (quindi una o più volte) ogni N anni; questo ci aiuta moltissimo nel calcolo per esempio di opere di intervento per valutare il rischio idrologico intrinseco associato ad un certo evento, calcolando la probabilità che l'evento temibile cioè che eguaglia o supera una assegnata soglia progettuale si verifichi almeno una volta durante la vita presunta dell'opera.

L'obiettivo della statistica è quello di estrarre l'informazione essenziale da un insieme di dati sintetizzandolo in un certo numero di parametri. Quelli più utilizzati sono: la tendenza centrale o media, la variabilità o varianza, la deviazione standard o scarto quadratico medio e la simmetria o coefficiente di asimmetria.

In statistica la media è un singolo valore numerico che descrive sinteticamente un insieme di dati. Esistono varie tipologie di media che possono essere scelte per descrivere un fenomeno. Quelle più comunemente impiegate sono le tre medie pitagoriche (aritmetica, geometrica, e armonica). La media aritmetica è il tipo di media impiegato più comunemente e quello al quale, con il termine "media", si fa in genere riferimento nel parlare comune.

Viene usata per riassumere con un solo numero un insieme di dati su un fenomeno misurabile (per esempio, l'altezza media di una popolazione).

Viene calcolata sommando i diversi valori a disposizione, i quali vengono divisi per il loro numero complessivo. La formula della media aritmetica semplice per n elementi è:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [1]$$

La varianza come pure la deviazione standard (la radice quadrata della varianza) costituisce una misura classica di dispersione.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad [2]$$

La deviazione standard è un indice di dispersione delle misure sperimentali, vale a dire è una stima della variabilità di una popolazione di dati o di una variabile casuale. La deviazione standard è uno dei modi per esprimere la dispersione dei dati intorno ad un indice di posizione, quale può essere, ad esempio, il valore atteso o una stima del suddetto valore atteso. La deviazione standard ha pertanto la stessa unità di misura dei valori osservati (al contrario della varianza che ha come unità di misura il quadrato dell'unità di misura dei valori di riferimento). In statistica la precisione si può esprimere come deviazione standard.

$$S = \sqrt{s^2} \quad [3]$$

Una misura di dispersione frequentemente utilizzata è costituita dal coefficiente di variazione CV definito come rapporto fra la deviazione standard S e la media m .

$$CV = \frac{S}{m} \quad [4]$$

Il coefficiente di variazione risulta definito solo se la media è diversa da zero, viene utilizzato soprattutto per confrontare la dispersione di campioni diversi.

L'insieme dei dati disponibili viene considerato come un campione estratto da una ipotetica popolazione di dimensione infinita. Le proprietà statistiche dei campioni (media, varianza, ecc) variano da campione a campione, mentre quella della popolazione sono uniche. Tramite tecniche di Interferenza statistica, le proprietà della popolazione vengono stimate a partire da quelle del campione disponibile. Quindi dato un campione di dati x_n della variabile casuale X, ci si pone il problema di determinare la forma di funzione F di x atta a rappresentare, con ragionevole approssimazione, la distribuzione vera ma incognita di X.

Riassumendo il processo di interferenza statistica richiede

- **la raccolta dei dati**

- **la scelta della distribuzione** in base alla variabilità di X (una o più forme analitiche di distribuzione)

-**la stima dei parametri della distribuzione**

-**test di controllo.**

Descriveremmo ora molto velocemente alcune delle più importanti **distribuzioni** di probabilità; quella normale, quella log-normale e la distribuzione di Gumbel.

La distribuzione normale deriva dalla proprietà detta teorema del limite centrale dove si dimostra che la funzione assume una distribuzione prossimamente normale; In altre parole, quando le manifestazioni di un carattere di un fenomeno sono il risultato della somma di un grande numero di azioni casuali indipendenti che seguono leggi di distribuzioni qualsiasi anche diverse fra loro, la manifestazione stessa ha una distribuzione prossima alla normale.

La formula di applicazione è:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad [5]$$

e ci vengono in aiuto anche delle tabelle chiamate di distribuzione cumulativa e della normale standard.

La distribuzione log- normale si applica tramite la seguente funzione di probabilità:

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right]^2\right\} \quad [6]$$

dove si assume che $\ln(x)$ segua una distribuzione normale, in questo caso abbiamo 2 parametri:

$$\mu = \ln x - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{s^2}{x^2}\right) \quad [7]$$

$$\sigma = \left[\ln\left(1 + \frac{s^2}{x^2}\right)\right]^{0.5} \quad [8]$$

calcolati in base alle tabelle prima citate.

La distribuzione di Gumbel dal nome del suo inventore, si utilizza anchessa con 2 parametri che sono:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6s}}{\pi} \quad [9]$$

$$u = x - 0.5772\alpha \quad [10]$$

e la formula è :

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-u}{\alpha} \right) \right] \quad [11]$$

Tutte queste distribuzioni ci giungono molto utili nel calcolo delle portate e dei tempi di ritorno partendo dagli annali idrologici o dagli annali di precipitazioni.

3.3 - Analisi statistica della relazione tra variabili idrologiche e morfologiche, test di (AICc)

Le analisi statistiche tra le variabili morfologiche e quelle idrologiche sono state eseguite attraverso il test di Akaike information criterion (AIC). In questo capitolo sarà riassunta la teoria di questo test e saranno chiarite le terminologie della regressione affrontate.

L'analisi della regressione è usata per spiegare la relazione esistente tra una variabile Y (continua) detta variabile dipendente, e una o più variabili dette covariate o variabili indipendenti, ($X_1, X_2, \dots X_k$). In termini di funzione abbiamo:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots X_k) + \varepsilon \quad [12]$$

che indica l'esistenza di un legame funzionale in media tra la variabile dipendente e i regressori, rappresentato dalla componente $f(X_1, X_2, \dots X_k)$ e alla quale suole dare il nome di componente sistematica. A questa componente va ad aggiungersi un'altra denominata accidentale, casuale, erronea. Mentre la prima rappresenta la parte della variabile risposta spiegata dai predittori, la seconda componente rappresenta quella parte di variabilità della risposta che non può ricondursi a fattori sistematici oppure facilmente individuabili, ma dovuti al caso e, più in generale, a cause diverse non prese in considerazione nel modello regressivo. Il legame funzionale teoricamente può essere di qualsiasi tipo, tuttavia nella pratica si preferisce utilizzare una funzione di tipo lineare e pertanto si parla regressione lineare multipla o modello lineare che assume la seguente formulazione:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots \beta_k X_k + \varepsilon \quad [13]$$

dove b_0 è detto termine noto, mentre b_1, \dots, b_k sono detti coefficienti di regressione e, insieme alla varianza dell'errore, sono i parametri del modello da stimare sulla base delle osservazioni campionarie. Diversi modelli, in apparenza non lineari, possono essere linearizzati tramite opportune trasformazioni di variabili.

Ad esempio, il modello moltiplicativo:

$$Y = B_0 X_1^{\beta_1} \dots X_k^{\beta_k} \varepsilon \quad [14]$$

può essere facilmente trasformato nel modello lineare prendendo i logaritmi di ambo i membri.

Si parla di regressione polinomiale quando i regressori nel modello figurano non solo con grado pari ad uno, ma anche con grado maggiore. Tuttavia il modello continua a rimanere lineare nei parametri. Quello che segue è un modello di regressione parabolica con due soli regressori:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_{12} X_1^2 + \beta_{13} X_1 X_2 + \beta_2 X_2 + \beta_{21} X_2^2 \quad [15]$$

che figurano con il primo e il secondo grado; si è preso in considerazione anche il fattore di interazione tra le variabili esplicative (X_1, X_2). Si parla di regressione non lineare quando i parametri risultano comparire in forma diversa da quella lineare.

Il criterio di informazioni Akaike è una misura della relativa bontà e di adattamento di un modello statistico. È stato sviluppato da Hirotugu Akaike, sotto il nome di "criterio di informazione" (AIC), e fu pubblicato da Akaike nel 1974. Si fonda sul concetto di entropia dell'informazione, in effetti esso offre una misura relativa della informazioni perse quando un dato modello viene utilizzato per descrivere la realtà. Si può utilizzare per descrivere il rapporto tra la polarizzazione e la varianza nella costruzione di un modello statistico, o in senso lato tra precisione e complessità del modello.

I valori AIC ci aiutano a fornire un mezzo per la selezione del modello; esso però non fornisce una prova concreta verificando quali ipotesi possono essere nulle, vale a dire AIC può dire quanto un modello si adatta ai dati in senso assoluto. Se tutti i modelli candidati sono stati adattati male, AIC non darà alcun avviso di tutto questo.

Nel caso generale, l'AIC è:

$$AIC = 2K - 2 \ln(L) \quad [16]$$

Dove k è il numero di parametri del modello statistico e L è il valore massimizzato della funzione di verosimiglianza per il modello stimato.

Dato un insieme di modelli candidati per i dati, il modello preferito è quello con il valore minimo AIC.

L'AIC valuta non soltanto l'adattamento, ma include anche una prova che è una funzione crescente del numero di parametri stimati. Questo ci spiega che aumentando il numero di parametri liberi nel modello migliora la bontà della stima, indipendentemente dal numero di parametri liberi nel processo di generazione di dati.

Si supponga che i dati sono generati da un processo f sconosciuto. Consideriamo due modelli candidati a rappresentare f : g_1 e g_2 . Se sapessimo f , allora potremmo trovare le informazioni perse di utilizzare g_1 per rappresentare f calcolando il Kullback - Leibler, $D_{KL}(f, g_1)$, allo stesso modo, le informazioni perse di utilizzare g_2 per rappresentare f sarebbe trovato calcolando $D_{KL}(f, g_2)$. Vorremmo quindi scegliere il modello di candidato che riduce al minimo la perdita di informazioni.

Non possiamo scegliere con certezza, perché non sappiamo f .; Akaike (1974) ha mostrato, tuttavia, che si può stimare, via AIC, quanto più (o meno) la perdita di informazioni da g_1 che da g_2 . È notevole che una tale formula semplice per i risultati AIC. La stima, però, è valida solo asintoticamente, se il numero di punti di dati è piccolo, allora qualche correzione è spesso necessario (vedere AICC, sotto).

Per applicare AIC in pratica, si comincia con una serie di modelli candidati, e quindi si trovano i valori corrispondenti all'AIC dei modelli. Ci saranno quasi sempre le informazioni perse a causa dell'uso di uno dei modelli candidati a rappresentare il modello "vero". Vogliamo selezionare, tra i modelli candidati R , il modello che riduce al minimo la perdita di informazioni. Anche qui non possiamo scegliere con certezza, ma possiamo ridurre al minimo la perdita stimata di informazioni. Indichiamo i valori AIC dei modelli candidati, $AIC_1, AIC_2, AIC_3, \dots, R AIC$. Sia il valore minimo di AIC (AIC_{min}) sia il minimo di tali valori (AIC_i).

$$\exp\left(\frac{(AIC_{min} - AIC_i)}{2}\right) \quad [17]$$

può essere interpretata come la probabilità che il relativo modello i -esimo (stimato) minimizza la perdita di informazioni.

Come esempio, supponiamo che ci sono stati tre modelli della serie candidato, con valori AIC 100, 102 e 110. Poi il secondo modello è $\exp((100-102)/2) = 0.368$ volte più probabile come il primo modello per minimizzare la perdita di informazioni, e il terzo modello è $\exp((100-110)/2) = 0.007$ volte più probabile come il primo modello per minimizzare la perdita di informazioni. In questo caso, vorremmo omettere il terzo modello da ogni ulteriore considerazione. Si potrà prendere una media ponderata dei primi due modelli, con pesi 1 e 0.368, rispettivamente, e poi fare inferenza statistica basata sulla multimodello ponderata; In alternativa, potremmo raccogliere ulteriori dati per distinguere fra i primi due modelli.

Se tutti i modelli della serie candidati hanno lo stesso numero di parametri, quindi utilizzando forza AIC in un primo momento sembra essere molto simile a quello con il rapporto di verosimiglianza di prova. In particolare, il rapporto di verosimiglianza del test è valido solo per i modelli nidificati, mentre AIC (e AICC) non ha tale restrizione.

La quantità di $\exp((AIC_{\min} - AIC_i) / 2)$ è la probabilità relativa del modello i .

La modifica di AIC in AICC viene effettuata prendendo la formula di AIC [16] con una correzione per campioni finiti:

$$AICC = AIC + \frac{2K(K+1)}{n-K-1} \quad [18]$$

dove n indica la dimensione del campione.

In pratica AICC è AIC, con una pena maggiore per i parametri aggiuntivi.

Burnham e Anderson (2002) consigliano vivamente di utilizzare AICC, piuttosto che AIC, se n è piccolo o k è grande. Dal momento che si avvicina al valore di AICC man mano che n di AIC cresce, AICC in genere dovrebbero essere impiegati a prescindere. Con AIC, invece di AICC, quando n non è molte volte più grande di $2k$, aumenta la probabilità di selezionare i modelli che hanno troppi parametri, cioè di *overfitting*. La probabilità di *overfitting* in AIC in alcuni casi può essere considerevole.

Brockwell & Davis AICC consigliano di utilizzare come criterio primario nella scelta dei ordini di un modello ARMA per le serie temporali.

McQuarrie e Tsai approvano la loro opinione su AICC nel lavoro di simulazione estesa con regressione e serie storiche.

Opinioni differenti arrivano da Brockwell & Davis, Burnham, Anderson, Cavanaugh affermando che per assumere un modello univariato lineare con errori normalmente distribuiti (subordinata regressori), tale ipotesi non regge, quindi la formula per l'AICC andrebbe modificata. Per questo Burnham e Anderson (2002) hanno eseguito un ulteriore approfondimento in questo, con esempi di altre ipotesi, in particolare affermano che la stima di solito è fattibile.

Si noti che quando tutti i modelli della serie candidati hanno la stessa k , poi AICC e AIC darà valutazioni identiche. In tale situazione, quindi, AIC può sempre essere utilizzato.

Nelle applicazioni pratiche quindi l'AICc a partire dal modello plausibile (ovvero fisicamente sensato) complesso, fornisce una classifica di modelli dal migliore al peggiore sulla base dell'indice di AICc (più è basso migliore è il modello).

Questa classifica viene creata eseguendo tutte le combinazioni possibili fra le varie variabili indipendenti impostate nel modello di partenza. È da notare pertanto che le varie

combinazioni vengono effettuate testando modelli con o meno certe variabili e variandone i coefficienti; eventuali interazioni fra variabili dovranno essere inserite direttamente dall'utente.

Una volta ottenuta la classifica si deve scegliere il modello seguendo le seguenti regole fondamentali:

- Scegliere il modello con l'AICc più basso;
- Individuare il modello nullo (se presente) e verificare una differenza nell'indice AICc pari ad almeno 2 con i modelli significativi

CAPITOLO 4

STUDI PREGRESSI RIGUARDANTI LE RELAZIONI TRA VARIAZIONI IDROLOGICHE E MORFOLOGICHE DI UN FIUME

La relazione tra le variazioni morfologiche e il regime idrologico è stato oggetto di studio in numerosi campi di ricerca della morfologia fluviale. Alcuni casi studi hanno verificato l'effetto di singoli eventi estremi nei cambiamenti del canale (ad es. Krapesch *et al.*, 2011; Kiss and Sipos; Chappel *et al.*, 2003; Carling, 1986) mentre altri analisi su scala più ampia possono comprendere qualche mese o un anno (ad es. Bertoldi *et al.*, 2010) o diversi anni (ad es. Hooke, 2008; Warner, 1987).

Nei fiumi a canali intrecciati l'intensa dinamica fluviale (Ashmore, 1991; Bertoldi *et al.*, 2009) e le modificazioni morfologiche indotte dall'uomo, evidenziate anche nella maggior parte dei fiumi italiani (ad es. Surian *et al.*, 2009) complicano le analisi di evoluzione morfologica su questi tipi di fiumi. L'evoluzione del canale dipende dalla portata liquida e solida che coinvolgono le interazioni reciproche tra forma del fondo, dimensione granulometriche, forze idrauliche (Lisle *et al.*, 2000) e la vegetazione presente nella zona di pertinenza fluviale (Moretto *et al.*, 2012; Picco *et al.*, 2012).

Gli effetti geomorfologici delle piene sono spesso oggetto di ricerca della geomorfologia fluviale, tuttavia, tuttavia sono relativamente pochi i lavori che mettono in relazione le variabili morfologiche con serie idrologiche di più anni in tratti di corsi d'acqua di qualche chilometro.

In particolare, il recente studio di Krapesch *et al.*, (2011) ha valutato l'effetto di un evento di piena catastrofico del 2005 accaduto nell'ovest dell'Austria ($TR > 100$ anni), mettendo in relazione diversi parametri idraulici e la variazione della larghezza del canale pre e post evento. Da questo lavoro emerge che l'attività morfodinamica è ben correlata allo *stream power* specifico, in particolare a scala di tratto e sottotratto.

Nell'analisi a più ampia scala spaziale e temporale questo approccio risulta difficilmente applicabile perché i dati morfologici, generalmente ottenuti da foto aeree, non permettono il calcolo della pendenza e hanno step temporali molto più ampi in cui si sommano gli effetti di più eventi di piena. Analisi di medio e lungo termine (ad es. Bertoldi *et al.*, 2010; Hooke, 2008; Winterbottom, 2000) non correlano i cambiamenti direttamente ad uno specifico evento, ma analizzano diverse variabili idrologiche ottenute dall'idrogramma, come il

massimo livello idrometrico raggiunto dalle piene e la larghezza del canale attivato (Bertoldi *et al.*, 2010), o la portata dei picchi di piena ed il numero dei picchi (Hooke, 2008).

CAPITOLO 5

IL FIUME BRENTA

Il Brenta è un fiume che interessa il nord est Italia origina dal lago di Caldonazzo nel Trentino, ad una altezza di circa 450 metri s.l.m., e dopo aver bagnato un vasto territorio della pianura veneta attraversando le province di Vicenza, Padova e Venezia, sfociando nel mare Adriatico dopo un percorso di 174 km.

5.1 - Il bacino idrografico del fiume Brenta

Il medio corso del fiume Brenta attraversa la pianura centrale veneta, lambendo Cittadella e Padova. E' compreso tra il primo tratto montuoso, che dai dintorni di Trento termina in Valsugana a Bassano del Grappa, e il terzo e biforcuto tratto finale, che da Stra porta il fiume al mare, a Venezia attraverso la Riviera del Brenta, o a Chioggia, sul Taglio Nuovissimo scavato dai veneziani.



Figura 23 : Rappresentazione del bacino montano del Brenta
(Tonini M., Pulselli U. in A.A.V.V., 1981).

Esso presenta una tipologia prevalentemente meandriforme. Nella prima parte, lasciate le montagne e sbucato in pianura a Bassano del Grappa, dove il bacino, agli effetti idrografici è considerato chiuso (sezione di chiusura), è largo anche 1.500 metri, disperdendosi così in gran parte ed andando ad alimentare la circolazione sub - alveale divisa in numerosi bracci ghiaiosi.

Più a valle, dal ponte di Friola fino a Carturo, l'alveo si restringe lasciando progressivamente intravedere un ramo principale. Oltre Carturo sono ben visibili le opere di difesa che diventano possenti arginature a sud di Piazzola, costringendo l'unico ramo fluviale ad andamenti sempre più rettilinei e accompagnandolo fino a Stra.



Figura 24: Panoramica a Fontaniva; e relativo tratto del fiume Brenta

Dal punto di vista granulometrico il primo tratto del bacino, quello più montano, è costituito da depositi alluvionali grossolani, depositi dalle correnti fluviali del Quaternario, altamente permeabili e formati per lo più da ciottoli e ghiaie. Nel secondo tratto dove si passa gradualmente a terreni estremamente permeabili, riceve gli apporti di numerose sorgenti che danno un contributo non indifferente alla portata del fiume, tra cui la più importante e quella dell'Oliero.

Successivamente, a causa dell' aumento dei depositi più minuti di tipo sabbioso - limoso, il terreno aumenta la propria impermeabilità dando origine alla zona delle risorgive.

A valle di Bassano del Grappa, le acque del fiume Brenta, che alimentano la falda sotterranea sia in destra che in sinistra, scorrono in direzione Sud - Ovest fino verso Tezze sul Brenta per piegare poi verso Sud - Est proseguendo fino alla foce.

All'altezza di Campo San Martino il corso d'acqua è chiuso entro argini continui e robusti che ne segnano il percorso meandriforme. A Limena, gli argini del fiume si restringono ed una briglia immette parte delle sue acque nel canale Brentella cedendo quindi al Bacchiglione una quota consistente della sua portata (8 - 10 m³/s) che gli viene in parte restituita più a valle, con la confluenza del Canale Piovego. Nel tratto padovano fra Carmignano di Brenta e Cadoneghe il Brenta riceve le rogge Ramon - Molina, Cognarola e Riale, il torrente Piovego di Villabozza ed infine il torrente Muson dei Sassi, suo più importante immissario a valle di Bassano, tutti posti in sinistra idrografica; in destra idrografica riceve solo parte delle acque della roggia Contarina, nei pressi di Piazzola sul Brenta. Dopo la confluenza con il Muson dei Sassi il Brenta scorre pensile sopra il piano campagna fino alla foce a Ca Pasqua in prossimità di Chioggia in Provincia di Venezia.



Figura 25 : Veduta del fiume Brenta a Nove.

5.2 - Tratto di studio: inquadramento globale

Il tratto del Fiume Brenta analizzato nel nostro studio (Figura 26), è lungo circa 20 km, e si localizza a valle del bacino idrografico montano con una superficie di 1567 Km² tra le città di Bassano del Grappa (VI) e Piazzola sul Brenta (PD).

Questa zona è situata in una posizione intermedia fra la pianura e la fascia pedemontana con precipitazioni medie annue di 1100 mm, concentrate in prevalenza in primavera ed autunno.

Il tratto è caratterizzato da una morfologia “braided” e “wandering”, ha un’ampiezza compresa tra 70 m e 800 m; e una pendenza media dello 0,0035 %.

All’interno del tratto di studio sono stati individuati tre sottotratti di lunghezza pari a 1,5 km dove sono state analizzate nel dettaglio la variazione dell’alveo attivo e l’evoluzione della vegetazione negli ultimi trent’anni. Essi sono posti a circa 5 km di distanza l’uno dall’altro e prendono il nome dalle località in cui si trovano: Nove, Friola e Fontaniva (Figura 26).

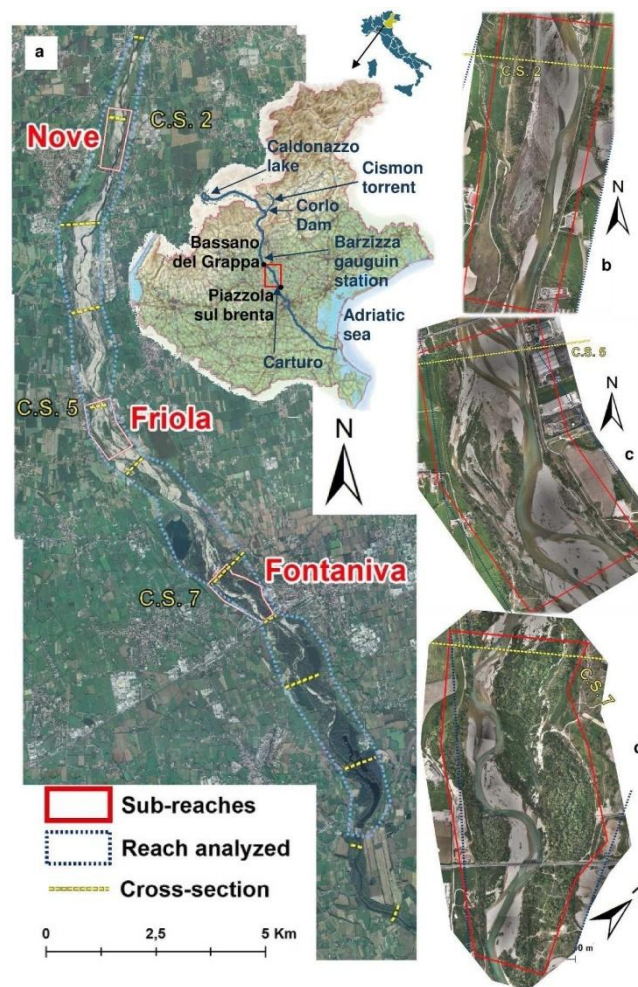


Figura 26 : Inquadramento geografico dell’area di studio. In evidenza i sottotratti analizzati

5.3 - Tratto di studio: caratteristiche morfologiche e morfometriche

Nei tratti presi in esame possiamo vedere e verificare dalla figura 27 che il primo sottotratto è unicursale con bassa sinuosità (*wandering*), ed ha una larghezza media della zona di pertinenza fluviale di circa 300 m.



Figura 27 : Primo sottotratto analizzato presso il comune di Nove.

A “Friola” il corso d’acqua assume una morfologia più complessa, si allarga fino a 500 m ed è concentrata una discreta copertura arborea. (Figura 28)

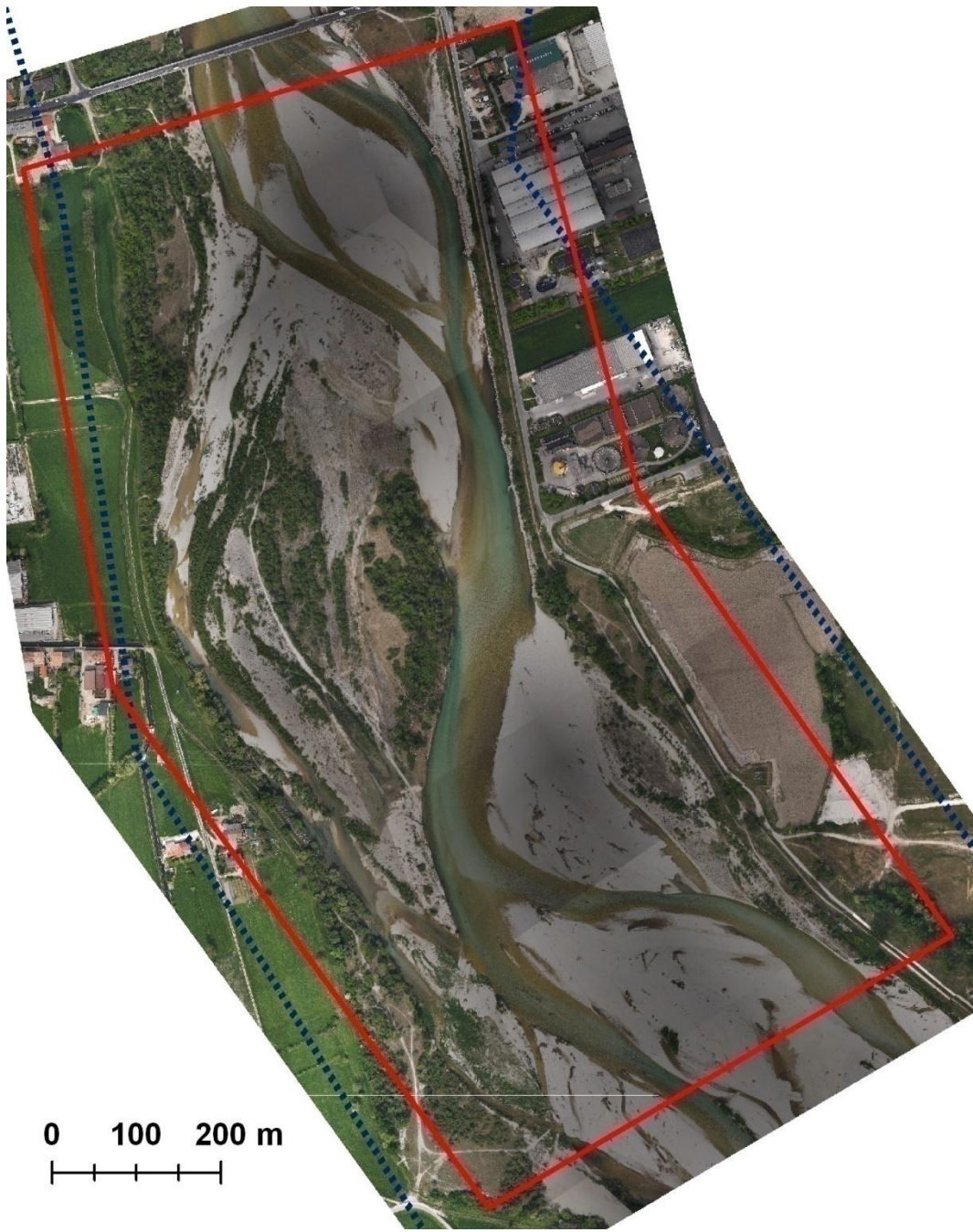


Figura 28: Secondo sottotratto analizzato presso il comune di Friola.

Nell'ultimo sottotratto (Figura 29) il Brenta è suddiviso in più canali che formano diverse isole fluviali (*braided*); la larghezza aumenta ulteriormente fino a 800 m.

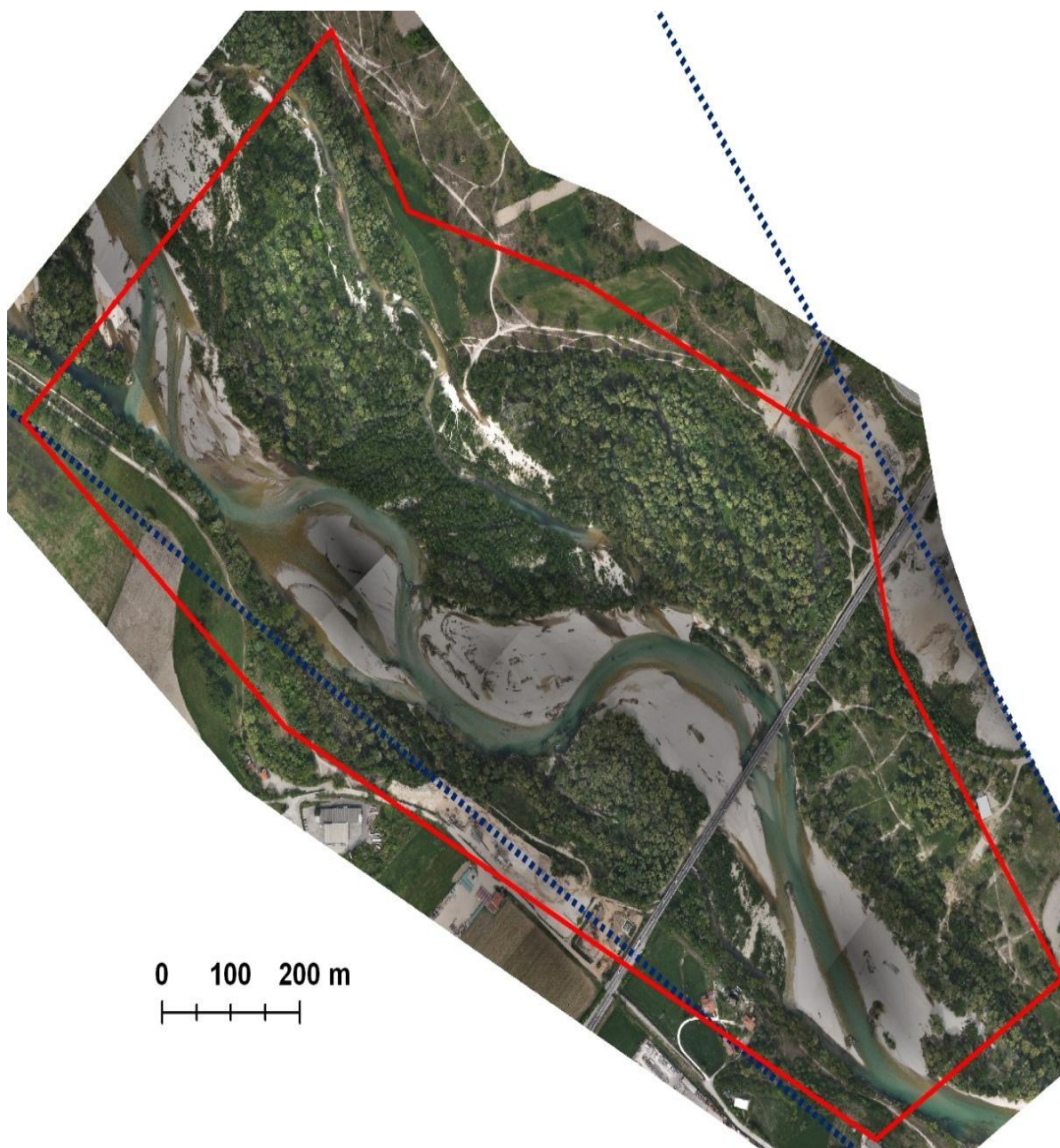


Figura 29 : Terzo sottotratto analizzato presso il comune di Fontaniva.

5.4 - Evoluzione morfologica del fiume e studi pregressi

L'andamento delle variazioni morfologiche del fiume Brenta nel medio e breve periodo, sintetizzate come variazione della superficie dell'alveo attivo, non è costante lungo tutto il tratto analizzato. Anche se viene confermato il pattern di diminuzione nella prima decade in tutti e tre i sottotratti analizzati, in particolare si osserva che a "Fontaniva" (sottotratto con il minor alveo attivo relativo) vi è un sostanziale equilibrio, mentre "Nove" e "Friola" riflettono l'andamento generale di tutto il tratto analizzato. Tuttavia, nel primo sottotratto la seconda fase di diminuzione dell'alveo attivo è maggiore (circa 10%) ed inizia prima rispetto a quanto avviene a Friola (1999 e 2003). L'estensione relativa delle isole fluviali (in rapporto alla superficie dell'alveo attivo) hanno un andamento altalenante nel periodo considerato. Si nota un netto aumento della vegetazione nella prima fase di restringimento dell'alveo, tuttavia alla minima estensione di quest'ultimo non corrisponde sempre la massima espansione di vegetazione, tranne nel caso del sottotratto "Nove".

Gli unici periodi in cui si assiste ad una riduzione della vegetazione in tutti i sottotratti indagati sono 1999 - 2003 e 2008 - 2010. Nel 2002 è stata registrata la massima portata di piena nel periodo analizzato (ad esclusione del 1980), pari a $756 \text{ m}^3/\text{s}$ con $\text{TR} = 11$ anni. Notevole è l'incremento di vegetazione che si è verificato nel sottotratto "Fontaniva" tra il 2003 ed il 2006 : in soli tre anni le isole hanno colonizzato 6 ha di superficie precedentemente classificata come ghiaie esposte.

Studi precedenti in questo bacino idrografico hanno analizzato i cambiamenti morfologici del canale del fiume (Surian e Cisotto, 2007;. Surian *et al*, 2009b, Moretto, 2010, Simonetto, 2010; Moretto *et al*, 2011),. i cambiamenti dell' uso del suolo del corridoio fluviale e l'abbondanza di legno in canale (Comiti *et al*, 2006,. 2008; Rigon *et al*, 2008, 2012;. Bathurst *et al*, 2010;. Vitti *et al*, 2011),.ed il trasporto di sedimenti e di bilancio dei sedimenti nelle sorgenti (Bathurst *et al*, 2003;. Lenzi *et al*, 2003, 2006;. Lenzi, 2006; Mao e Lenzi, 2007). L'evoluzione di questo tratto del fiume Brenta è molto interessante da studiare perché questo ha risentito di una forte pressione umana proveniente da un impianto idroelettrico e dalla densa e passata attività estrattiva di ghiaia.

CAPITOLO 6

MATERIALI E METODI

Siamo partiti con questo lavoro sperimentale da una dettagliata analisi eseguita sulla base di foto aeree (per verificare le modificazioni morfologiche) e di strumenti idrologici (per controllare i cambiamenti dal punto di vista idrologico) del tratto in questione; le prime legate perciò alla geometria del corso d'acqua ed i secondi legati a parametri idraulici dello stesso. Queste analisi ci hanno permesso di capire come nel corso degli anni si siano modificate le caratteristiche del fiume e di conseguenza ci siamo posti l'obiettivo di cercare di trovare un nesso tra le due cose; capire e verificare dal punto di vista statistico se delle variabili morfologiche sono correlate ad altre variabili idrologiche con lo scopo di dare delle indicazioni in termini di gestione e pianificazione efficace del luogo.

6.1 - Aerofotogrammetria ed interpretazione delle foto aeree

L'aerofotogrammetria è attualmente il sistema di rilevamento più utilizzato nella realizzazione di cartografia per uso tecnico. Il motivo di questo risiede essenzialmente nella velocità di tracciamento e acquisizione degli elementi topografici (antropici e naturali) nonché nella precisione geometrica ottenibile, relativamente a zone molto ampie di territorio da cartografare.

Il processo di produzione cartografica può essere suddiviso in 8 fasi distinte:

- Stesura del piano di volo
- Esecuzione della Ripresa Aerea
- Topografia di base
- Triangolazione Aerea
- Restituzione Aerofotogrammetrica
- Editing Cartografico
- Ricognizione sul terreno
- Disegno Finale

Nella prima fase vengono studiate le modalità di copertura fotografica del territorio da cartografare. Quest'ultimo dunque viene suddiviso in strisciate fotografiche, il cui

orientamento e numero dipende dalla sua stessa forma e in secondo luogo dalla scala di realizzazione del rilievo.



Figura 30: Esempio di "strisciata" aerea.

La ripresa aerea è sicuramente la fase più delicata dell' intero processo di produzione. E' proprio nel suo espletamento infatti che verranno poste le basi per la perfetta riuscita del rilievo. Ogni strisciata è costituita da una serie variabile di modelli. Per modello si intende una coppia di fotogrammi caratterizzati da un'area di copertura comune detta "zona di sovrapposizione". In pratica per ogni modello abbiamo una stessa porzione di territorio, fotografata però in due momenti diversi della ripresa aerea.

Fino a qualche anno fa la restituzione aerofotogrammetrica veniva effettuata attraverso strumenti chiamati stereo restitutori, vere e proprie opere di ingegneria meccanica ed elettronica, ma oramai obsoleti e sostituiti dalle più versatili Stazioni Digitali o *Work Stations*, costituite da computer, monitor e sistema di visione 3D in grado (attraverso apposito *Software*) di ripristinare a tavolino, le condizioni di presa fotografica esistenti al momento dell' esecuzione del volo. Questo si ottiene effettuando particolari operazioni di orientamento della coppia stereoscopica, che hanno come risultato finale la possibilità di osservare in modo tridimensionale il territorio da cartografare.



Figura 31 : Esempio di digitalizzazione fotografica.

Una volta eseguito l'orientamento della coppia stereoscopica ha inizio il processo di acquisizione dati (restituzione aerofotogrammetrica). Questa fase, è svolta da operatori specializzati che devono possedere oltre alla necessaria abilità nell'uso dei sistemi informatici di acquisizione dati, anche indispensabili doti di fotointerpretazione. L'acquisizione dati infatti, viene effettuata tracciando a video tutti i particolari osservabili dalla foto digitale e classificando questi ultimi attraverso gli standard convenzionali stabiliti dagli appositi capitoli cartografici.

Ad ogni modo la sola fase di restituzione non è sufficiente a garantire una completa interpretazione dei particolari antropici o naturali che costituiscono il territorio, essa ha infatti un'attendibilità stimabile intorno all' 85% . Occorre dire che questo è un valore medio, dipendente dall'altezza di volo del rilievo, quindi dalla scala di realizzazione della cartografia. A completamento del rilievo si procede quindi, con una fase di analisi in campagna, utile a colmare le lacune interpretative legate alla fase di restituzione (zone d'ombra, zone caratterizzate da fitta vegetazione, ecc...). Sarà dunque la fase di editing a completare il rilievo cartografico, attraverso una minuziosa analisi della veste grafica e del contenuto informativo della carta, fino al raggiungimento del prodotto finito.

Il prodotto così ottenuto può essere utilizzato come:

- Base per progettazione e studio, rappresentazione di fenomeni territoriali.
- Base per la formazione di Sistemi Informativi Territoriali.

Nella seconda ipotesi si procede alla formazione di una vera e propria banca dati informatica, nella quale verrà operata un'associazione tra dati numerico - vettoriali (risultato diretto della restituzione aerofotogrammetrica) e informazioni di tipo alfanumerico o *raster*, fino alla formazione definitiva di un Sistema Informativo Territoriale (o G.I.S).

6.1.1 - Accuratezza delle misure e possibili fonti di errore

Si ritiene utile fare alcuni cenni agli errori che si possono riscontrare nell'utilizzo della cartografia sia fotografica che topografica. Dovendo infatti valutare se un parametro ha subito delle variazioni nel corso del tempo, è fondamentale sapere quale è il grado di accuratezza delle misure che sono state effettuate.

Specialmente nel caso di cartografia storica e delle immagini tele rilevate, che vengono analizzate tramite GIS, l'accuratezza è determinata da vari fattori quali la qualità del documento originale, la risoluzione geometrica del documento, il processo di georeferenziazione del documento, il processo di digitalizzazione dell'alveo fluviale.

Qualità del documento originale. Soprattutto nel caso della cartografia è opportuno valutare se il documento utilizzato presenta delle distorsioni geometriche, che possono essere dovute ad un cattivo stato di conservazione del documento oppure al fatto che il documento non è un originale, ma una fotocopia.

Risoluzione geometrica del documento. La risoluzione geometrica (dimensione del pixel del documento in formato *raster*) dipende dalle caratteristiche geometriche del documento originale, oltre che, ovviamente, dal sistema di scannerizzazione utilizzato.

Georeferenziazione del documento. L'accuratezza del processo di georeferenziazione dipende dalla risoluzione geometrica del documento, dalla risoluzione del documento utilizzato come riferimento (ad esempio la Carta Tecnica Regionale), dal numero di punti ("control points") e dall'algoritmo utilizzati nel processo di georeferenziazione.

Digitalizzazione dell'alveo. L'accuratezza geometrica degli elementi dell'alveo (sponde, isole, ecc.) che vengono digitalizzati dipende dalla scala di lavoro, ossia dalla scala utilizzata dall'operatore al momento della digitalizzazione, e da fattori quali scarpate ed ombre (determinate dalle scarpate stesse e dalla vegetazione).

Vari lavori si sono occupati della valutazione degli errori nell'uso della cartografia e delle immagini telerilevate in studi di geomorfologia fluviale (Gurnell, 1997; Winterbottom, 2000; Mount *et al.*, 2003; Hughes *et al.*, 2006). A titolo di esempio, nel caso di analisi effettuate su alcuni fiumi italiani è stato valutato che l'errore massimo associato alle misure di larghezza dell'alveo può essere dell'ordine di 15 - 20 m, nel caso della cartografia storica, mentre di 5 - 6 m, per quanto riguarda le misure effettuate su foto aeree (Surian *et al.*, 2009a). Tali valori possono essere presi come un primo riferimento indicativo, ma in pratica si raccomanda una valutazione caso per caso sulla base dei fattori sopra descritti (risoluzione geometrica, georeferenziazione, digitalizzazione).

Nell'impiego dei rilievi topografici è opportuno prendere in considerazione (a) la qualità/accuratezza del rilievo originale e (b) la fase di confronto di rilievi realizzati in periodi differenti.

(a) Nel caso di rilievi già disponibili, ossia non eseguiti ex novo, è utile conoscere le modalità di realizzazione del rilievo, ad esempio per rilievi recenti se eseguiti con strumentazione più tradizionale (ad esempio stazione totale) o GPS differenziale. Anche per rilievi LiDAR, come per quelli GPS, è importante acquisire informazioni sull'accuratezza del rilievo per poter quindi valutare l'errore associato ai dati.

(b) Nel confronto di rilievi realizzati in periodi differenti si possono presentare due tipi di problemi. Il primo si può presentare nel caso delle sezioni trasversali, quando le sezioni non coincidono esattamente da un punto di vista planimetrico. In questo caso bisogna valutare se lo sfasamento planimetrico, che comunque deve essere al massimo dell'ordine di alcune decine di metri, può essere accettabile o meno (la pendenza del corso d'acqua è un fattore rilevante in questa valutazione). Il secondo problema è determinato dai sistemi di riferimento, in quanto i rilievi più recenti acquisiti con GPS e LiDAR sono generalmente disponibili in sistemi ellissoidici, a differenza di quelli acquisiti in passato nei quali le quote sono geoidiche. Risulta pertanto molto importante poter effettuare una conversione accurata da quote ellissoidiche a quote geoidiche.

In linea generale, errori centimetrici sono senz'altro accettabili per un'analisi delle variazioni altimetriche dell'alveo, mentre bisogna iniziare a prestare molta attenzione quando gli errori sono di alcune decine di centimetri. In quest'ultimo caso gli errori diventano infatti confrontabili con l'entità di variazioni che possono essere ritenute significative.

6.2 - Interpretazione di foto aeree sul Fiume Brenta

L'evoluzione delle isole e della morfologia dell'alveo negli ultimi 30 anni sono state analizzate su nove serie di foto aeree scattate sempre in condizioni di basso livello idrico negli anni: 1981, 1990, 1994, 1999, 2003, 2006, 2008, 2010, 2011. (Tabella 1)

Tabella 1: Serie di foto aeree realizzate nel tratto in questione del Fiume Brenta.

Anno	Pixel	Scala approssimativa	Altezza di volo (m)	Focalizzazione (mm)	Mese di volo	Compagnia aerea
1981	1.00	1: 17000	2600	153.13	15 Aprile	CGR Parma
1990	1.00	1: 20000	3000	152.82	15 Aprile	CGR Parma
1994*	0.35	1: 20000	8000	305.38	20 Settembre	CGR Parma
1999	1.00	1: 16000	2500	153.26	23 Giugno	CGR Parma
2003	0.50	1: 10000	5400	150.00	Magg. Nov.	CGR Parma
2006	0.50	1: 10000	5400	150.00	Magg. Nov.	CGR Parma
2008 A	0.40	1: 8000	1250	153.64	15 Luglio	Rossi - Firenze
2008 B	0.75	1: 16000	2400	153.64	Luglio	CGR Parma
2010	0.15	1: 12000	2000	100.47	Agosto	CGR Parma
2011	0.15	1: 12000	2000	50 - 35	12 Aprile	OGS

* La volata del 1994 non include il sottotratto di Nove

Le foto aeree sono state retificate e co - registrate in un data base comune in scala 1:5000 usando un software GIS (ESRI® ArcGIS 10). Per determinare la qualità delle immagini e quindi il margine d'errore, abbiamo preso in considerazione circa 40 punti di controllo del suolo usati per ogni singola finestra, ottenendo così un *range* di errore (RMSE *Root mean square errors*) che varia da 15 cm a circa un metro di dimensione del pixel , quest'ultimo valore dovuto alla qualità nelle prime riprese degli anni ottanta e novanta dove la tecnica era in fase sperimentale.

Per analizzare le foto sono stati utilizzati alcuni metodi citati in precedenza e descritti da Comiti *et al.* (2011) per verificare l'attività del canale e l'estensione delle isole fluviali nel tratto di 20 km preso in considerazione.

in modo tale di identificare l'alveo attivo e la vegetazione "stabile" che forma le isole fluviali. L'alveo attivo comprende la porzione del canale principale con deflusso, ghiaie nude e vegetazione annuale (fino al livello idrometrico *bankfull*, Qbf con TR = 1,5 - 2 anni), mentre

le isole fluviali includono isole pioniere, giovani e stabili secondo la classificazione di Gurnell & Petts (2002).

Nell'identificazione dei cambiamenti morfologici dell'alveo attivo e della vegetazione stabile che forma le isole fluviali nel tratto di studio sono stati presi 85 punti 250 m l'uno dall'altro in transetti perpendicolari alle rive creati in ambiente GIS (Moretto *et al* 2012, Brenta 30 anni).

6.3 - Serie storica dei dati idrologici sul Fiume Brenta

I dati idrologici presi in esame sono stati misurati nella stazione idrologica di Barzizza gestita dal 1924 fino al 1996 dall'agenzia idrografica e idrologica nazionale italiana, sostituita poi nel 1997 fino ad oggi dall'ARPAV (agenzia per la protezione ambientale della regione veneto).

La stazione di valutazione è localizzata a 5 km a monte del primo tratto analizzato. Le portate medie giornaliere sono riconducibili a 2 periodi quali 1924 - 1996 e 2005 - 2011. Dal 1997 al 2004 le portate medie sono state ottenute tramite l'applicazione di curve di portata poi invece fatte e convalidate dall'ARPAV per il periodo 2005 - 2011.

Tutte le valutazioni delle due serie di dati e di alcuni dati originali mancanti sono stati verificati e calcolati tramite correlazioni a intreccio e tecniche di interpolazione. (Kaless *et al.*, 2011; Lenzi *et al.*, 2010).

Tuttavia nella valutazione del livello idrologico nella stazione di Barzizza mancano per alcune parti negli anni 1942 - 1943 - 1944 - 1945 - 1946 - 1967 - 1968 e 1984 e per questo per certi periodi non è stato possibile stimare le portate medie giornaliere tramite le tecniche di interpolazione.

Un confronto tra i livelli massimi istantanei di acqua, i valori medi delle portate massime giornaliere e delle massime orarie è stato effettuato per 24 eventi di piena misurati in campo dall'ARPAV verificatosi nel periodo che va dal 2004 al 2009. Gli eventi di piena sono stati scelti con criterio per garantire sia la non dipendenza tra due piene consecutive (valutati per ogni evento di piena) e per coprire un vasto *range* di portata massima. Una buona correlazione è stata ottenuta da Kaless *et al* nel 2011 valutando le medie massime giornaliere e le medie massime orarie ($r^2 = 0.98$). Estendendo questa analisi per l'intero *dataset* o set di dati a nostra disposizione considerando un totale di 79 eventi di piena della serie idrologica storica a partire dal 1924 (Figura 32) abbiamo definito la funzione della distribuzione di probabilità e il calcolo dei tempi di ritorno per la stima di un evento di piena. (Moretto *et al.*, 2012; Lenzi *et al.*, 2010; Kaless *et al.*, 2011).

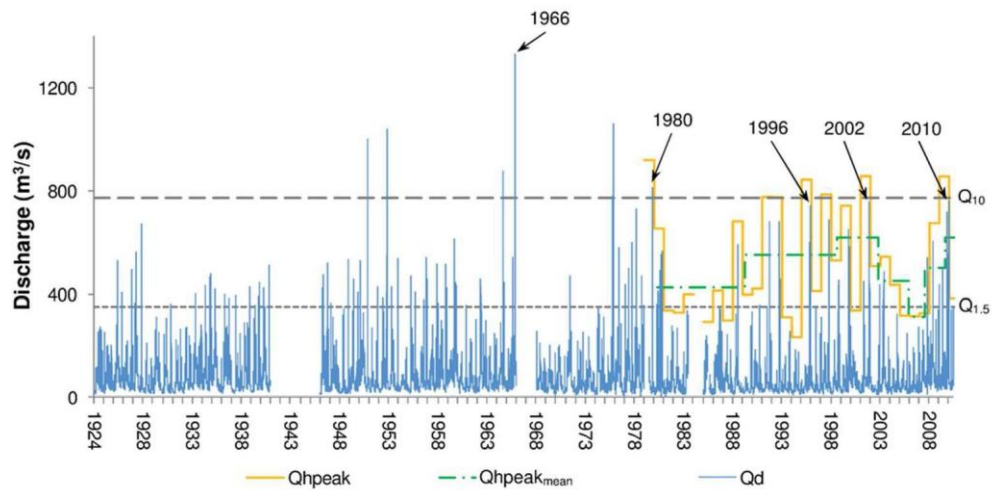


Figura 32: Idrogramma riguardante la stazione di Barzizza dal 1924 al 2011; in azzurro le portate medie giornaliere orarie registrate negli anni 1924 - 2011, con evidenziate in giallo le portate massime orarie ed in verde le portate massime annuali dal 1980 al 2011.

6.4 - Catalogazione dei dati e creazione del *dataset*

Una volta rilevati tutti i dati si pone il problema di selezionare quelli da inserire nel modello statistico. Si possono seguire due strade, la prima consiste nell'inserire tutte le variabili che si suppone possano essere significative; il modello così ottenuto potrà però essere ridondante e perdere parte della sua capacità esplicativa. La seconda selezionare delle variabili secondo determinati criteri analizzando per esempio che non ci siano sovrapposizioni numeriche ecc; Bisogna infatti considerare che un principio basilare nella costruzione dei modelli analitici è quello della parsimonia: a parità di altri fattori sono da preferire i modelli che contengono il numero più basso di variabili indipendenti.

Il *dataset* su cui applicare le nostre prove (la regressione derivata dall'AICc) e testare le ipotesi iniziali, deriva dalle variazioni morfologiche e idrologiche fra i vari *step* temporali in cui si aveva la disponibilità dei fotogrammi aerei:

Tabella 2 : Catalogazione delle date di ogni foto Aerea.

CODICE	Data Foto
A	15/04/1981
B	15/04/1990
C	20/09/1994
D	23/07/1999
E	15/08/2003
F	15/07/2006
G	15/07/2008
H	02/09/2010
I	24/04/2011

Per ogni data riportata nella tabella 2 sono state ottenute da fotointerpretazione le superfici d'alveo attivo e di isole fluviali del periodo. La data del 1994 non include il sottotratto di Nove per cui non è stata considerata nelle analisi.

Successivamente si sono creati due *dataset*: il primo in cui si considerano le variazioni morfologiche, temporali ed idrologiche fra i vari periodi denominato *dataset* semplificato (perchè rettificato e quindi con un numero minore di dati) , ed il secondo denominato *dataset* completo in cui si considerano tutte le combinazioni temporali possibili come riportato nella tabella 3 :

Tabella 3 : Analisi delle date delle foto aeree.

STEP TEMPORALE	N° GIORNI
HI	234
FG	731
GH	779
GI	1013
EF	1065
DE	1484
FH	1510
FI	1744
EG	1796
DF	2549
EH	2575
EI	2809
DG	3280
AB	3287
BD	3386
DH	4059
DI	4293
BE	4870
BF	5935
BG	6666
AD	6673
BH	7445
BI	7679
AE	8157
AF	9222
AG	9953
AH	10732
AI	10966

Questo secondo *dataset* puramente dal punto di vista statistico non è corretto perché presenta sovrapposizione dei campioni (sovrapponendo i vari *step* temporali), quindi in questo secondo ogni campione non può dirsi indipendente o replica (in gergo tecnico). Pertanto i risultati del secondo *dataset* sono da prendersi puramente come prova (in quanto verranno seguiti solamente i risultati del primo), ma i suoi valori saranno utili nella fase di verifica. Infatti un risultato auspicato è la creazione di scenari tipo in cui si diano indicazioni dell'evoluzione possibile in funzione di tempo e portata, il raffronto con diversi *step* temporali sarà quindi fondamentale per la validazione dei risultati ottenuti.

Ora da tutti i dati in nostro possesso abbiamo estrapolato 9 parametri idrologici e 16 morfologici più una variabile temporale da prendere in considerazione per ogni prova tranne per gli indici che contengono già il tempo al loro interno.

6.5 - Variabili Morfometriche considerate

Dal punto di vista morfologico i parametri sono stati denominati con l'abbreviazione MORFO e differenziati in 4 tipologie e due differenti scale spaziali intese come estensione di veduta. Sono perciò riconducibili ad una scala spaziale "ampia" denominata di "tratto intero" con un'estensione pari a circa 20 km e ad un'altra più di dettaglio denominata "di sottotratto", con un'estensione pari a circa 1.5 km. In tutto sono stati ricavati 3 sottotratti da monte verso valle denominati Nove, Friola e Fontaniva. (Tabella 4)

Tabella 4 : Variabili morfologiche considerate.

CODICE	VARIABILE DIPENDENTE	LEGENDA
MORFO 1	T.I. Δ A.A.	Tratto intero: differenza alveo attivo
MORFO 2	T.I. Δ I.	Tratto intero: differenza isole
MORFO 3	T.I. Δ (A.A.-I.)	Tratto intero: differenza alveo attivo meno isole
MORFO 4	T.I. Δ T.R.S.	Tratto intero: differenza trensetti
MORFO 5	NO Δ A.A.	Nove: differenza alveo attivo
MORFO 6	NO Δ I.	Nove: differenza isole
MORFO 7	NO Δ (A.A.-I.)	Nove: differenza alveo attivo meno isole
MORFO 8	NO Δ T.R.S.	Nove: differenza trensetti
MORFO 9	FR Δ A.A.	Friola: differenza alveo attivo
MORFO 10	FR Δ I.	Friola: differenza isole
MORFO 11	FR Δ (A.A.-I.)	Friola: differenza alveo attivo meno isole
MORFO 12	FR Δ T.R.S.	Friola: differenza trensetti
MORFO 13	FO Δ A.A.	Fontaniva: differenza alveo attivo
MORFO 14	FO Δ I.	Fontaniva: differenza isole
MORFO 15	FO Δ (A.A.-I.)	Fontaniva: differenza alveo attivo meno isole
MORFO 16	FO Δ T.R.S.	Fontaniva: differenza trensetti

Le quattro tipologie sono:

- **Differenze superficiali di alveo attivo:** Differenza in ettari della superficie dell'alveo attivo tra i due anni considerati (ettari anno più recente meno ettari anno più vecchio considerato);

- **Differenze superficiali di isole:** Differenza in ettari della superficie delle isole fluviali tra i due anni considerati (ettari anno più recente meno ettari anno più vecchio considerato);
- **Differenze superficiali di alveo attivo depurato dalla superficie delle isole;**
- **Differenza di larghezza media derivata da transetti:** La media delle larghezze utile ad effettuare la differenza della larghezza media tra i due anni considerati (più recente meno più vecchio) è stata derivata dalla media di transetti perpendicolari al talweg posti a 250 m di interdistanza rappresentanti la larghezza dell'alveo attivo nel punto considerato.

Questo è stato eseguito per ogni fascia temporale (vedi paragrafo Analisi statistica 6.7.1) presa in considerazione ed estratte grazie alla foto interpretazione. (Capitolo 6.2)

6.6 - Variabili Idrologiche - Temporali considerate

Le variabili idrologiche - temporali (semplici o composte) calcolate a partire dalla portata giornaliera media (vedi capitolo 6.3) sono state denominate con l'abbreviazione IDRO ed anch'essi differenziati in 4 categorie ed inserita al proprio interno anche la scala temporale TIME. Queste sono considerate variabili indipendenti che saranno poi analizzate in relazione alle variabili dipendenti cioè quelle morfologiche.

Tabella 5 : Variabili idrologiche considerate.

CODICE	VARIABILE INDIPENDENTE	LEGENDA
TIME	TIME	numero di giorni trascorsi
IDRO 1	$gg > Q_{1,5TR}$	numero di giorni con portata (Q) superiore a quella con un magnitudo di 1,5 anni come tempo di ritorno (TR)
IDRO 2	$\sum Q > 1,5 TR$	sommatoria delle portate (Q) con Q superiore a 1,5 TR
IDRO 3	$n_{EV} > 1,5 TR$	numero di eventi con Q superiore a 1,5 TR
IDRO 4	$\sum [Q > Q_{1,5} / (LN y_{ph} + 1)]$	dove y_{ph} = numero di anni che separano l'evento dalla foto finale
IDRO 5	$\sum Q_{max} > Q_{1,5}$	sommatoria della portata dell'evento maggiore eccedenti il $Q_{1,5}$
IDRO 6	$\sum [(Q > Q_{1,5} / y_{ph}) * (LN y_{fi} + 1)]$	dove y_{fi} = anni intercorsi dall'ultimo evento superiore a $Q_{1,5}$
IDRO 7	$\sum \{ [(Q > Q_{1,5} / (LN y_{ph} + 1))] * (LN y_{fi} + 1) \}$	dove y_{fi} = anni intercorsi dall'ultimo evento superiore a $Q_{1,5}$
IDRO 8	Picco_Qmax	portata media giornaliera dell'evento maggiore
IDRO 9	$gg_{Q < 5\%} + gg > 1,5TR$	dove $Q_{5\%}$ è la portata inferiore alla portata pari a 5 giorni

Le quattro categorie sono:

- **Sommatoria di portate:** questa categoria prevede la sommatoria delle portate al di sopra di un certo limite di tempo di ritorno o la portata dell'evento maggiore che ha interessato il periodo considerato; (IDRO 2, IDRO 5)
- **Sommatoria di giorni:** questa categoria prevede la sommatoria dei giorni al di sopra di un certo limite di tempo di ritorno che hanno interessato il periodo considerato; (IDRO 1, IDRO 9)
- **Sommatoria di picchi:** questa categoria prevede la sommatoria del numero di picchi al di sopra di un certo limite di tempo di ritorno che hanno interessato il periodo considerato; (IDRO 3, IDRO 8)
- **Indici portata – tempo:** indici al interno dei quali si esprime in un unico numero relazioni fra portata, tempo e/o fascia temporale considerata che hanno interessato il periodo considerato; (IDRO 4, IDRO 6, IDRO 7)

Questo è stato eseguito per ogni fascia temporale (vedi paragrafo Analisi statistica 6.7.1) presa in considerazione, ed estratte grazie all'analisi idrologica . (Capitolo 6.3)

6.7 - Analisi Statistica dei dati riguardanti il fiume Brenta

Lo scopo principale di questa tesi è quello di determinare se le variazioni morfologiche del fiume Brenta negli ultimi 30 anni (Moretto *et al.*, 2012) sono dovute a fluttuazioni nella serie idrologica, o se sono legati ad altri fattori. Inoltre, determinare quali sono le variabili (ad es. portata cumulata o numero di giorni in cui la portata alla *bankfull* è superata) che meglio si correlano all'evoluzione della larghezza dell'alveo.

Le analisi statistiche che normalmente vengono utilizzate per verificare un eventuale dipendenza di una variabile con un'altra/altre sono l'analisi della varianza e la regressione. Nel nostro caso consapevoli in partenza di non possedere un *dataset* sufficientemente ampio per rispondere ai requisiti di base di queste analisi classiche, abbiamo optato per eseguire un'analisi di regressione più recente denominata "Akaike information criterion" "(AICc) capace di fornire indicazioni statisticamente "accettabili" anche in presenza di *dataset* ridotti. (Vedi cap 3.3)

6.7.1 - Applicazione dell'AICc con il programma statistico R

R è un programma che sta prendendo piede nell'ambito della ricerca statistica la cui caratteristica più interessante è quella di essere di pubblico dominio e quindi completamente gratis, da cui facilmente accessibile anche per gli studenti universitari e di essere un programma che ha già implementate diverse applicazioni statistiche, permettendo un ampio margine di operabilità ed una buonissima progettazione.



Figura 33: Logo del marchio R

Abbiamo utilizzato questo programma per velocizzare il calcolo statistico ed in particolare nell'applicazione della regressione quindi della varianza e del calcolo dell' AICc.

Il programma si basa sulle quattro fasi fondamentali della statistica come spiegati nel capitolo 3.2 perciò sull'acquisizione dei dati, sulla scelta e sulla stima dei parametri di distribuzione ed infine del test di controllo.

Quindi si inserisce il *data set* sul programma e si avviano i comandi delle operazioni che dobbiamo eseguire come riportato sulla Figura 34.

```
# QUESTO SCRIPT PERMETTE DI CARICARE I DATI IN R ED ESEGUIRE LE REGRESSIONI

# PER LANCIARE GLI SCRIPT IN R SI DEVONO COPIARE NELLO SCRIPT EDITOR DI R ED
# ESEGUIRLI POSIZIONANDOSI ALLA FINE DELLA RIGA CON CTRL + R

#####
CARICAMENTO DATASET E STATISTICHE DESCRITTIVE
#####

# QUESTO COMANDO PERMETTE DI CARICARE IL DATASET, N.B. INSERIRE IL PROPRIO PERCORSO
# DELLA CARTELLA (IL DATASET DEV'ESSERE UN FILE .TXT DELIMITATO DA TABULAZIONE ED
# UTILIZZANDO IL PUNTO COME SEPARATORE DECIMALE
brenta<- read.table
(file="C:\\Users\\Moretto\\Desktop\\Johnny\\Dottorato\\BRENTA\\LiDAR_Brenta\\Br_LiD
AR_2011\\Elaborazioni_2011\\OUTPUT_bat2011\\Dataset_x_R_2011\\noveKRIG_2011.txt",
header = TRUE)

# LEGGE IL NOME DELLE VARIABILI PER POTERLE POI RICHIAMARE
attach(brenta)
```

```

# STATISTICHE DI BASE SUL DATASET
summary(brenta)

# SCATTERPLOT (x ora non farlo)
pairs(brenta)

#####
modello LINEARE POLINOMIALE (DETTREND KRIGING) METODO AICC DI REGRESSIONE
#####

# INSTALLARE PACCHETTO MuMIN DA INSTALLA PACCHETTI E POUl RICHIAMARLO LANCIANDO
QUESTO COMANDO
library(MuMin)

# MODELLO INIZIALE AICC
mod1<-lm (MORFO1 ~ IDRO1 + TIME)

dd<-dredge(mod1)

dd

```

Figura 34 : Script di R per l'applicazione di AICc

Nella figura si vedono ben suddivise le varie fasi, caricato il *dataset* si passa alla fase di analisi che va ripetuta per ogni modello di variabile e *dataset* considerato.

Riportiamo un esempio che mostra il risultato dei comandi visti sopra:

```

Global model call: lm(formula = MORFO1 ~ IDRO5 + TIME)

Model selection table

```

	(Intrc)	IDRO5	TIME	df	logLik	AICc	delta	weight	
1	-8.414			2	-38.731	84.5	0.00	0.886	MODELLO NULLO
2	-46.190	0.06011		3	-37.861	89.7	5.26	0.064	MODELLI SIGNIFICATIVI
3	24.750		-0.02117	3	-38.102	90.2	5.74	0.050	
4	-12.100	0.07218	-0.02660	4	-36.503	101.0	16.54	0.000	

Figura 35 : Esempio di modello applicativo

Nel caso dell'esempio sopra riportato vediamo che sono state considerate le variabili MORFO 1 IDRO 5 E TIME. Il programma ha ricavato 4 possibili modelli , quindi controllando i vari parametri a nostra disposizione dobbiamo determinare quale delle opzioni sono significative.

In questo esempio i modelli significativi (2, 3, 4) hanno una differenza di indice (delta) superiore a due, quindi possono essere considerati validi.

Fra i modelli significativi dobbiamo scegliere il modello con AICc più basso e che abbia un senso fisico. In questo caso l'ultimo dei quattro modelli è quello più significativo.

Anche questa operazione è stata eseguita per tutti parametri considerati e per entrambe i *data set*.

CAPITOLO 7

RISULTATI E DISCUSSIONI

I dati ottenuti con le metodologie descritte precedentemente sono stati elaborati ed analizzati prima separatamente e poi attraverso il software statistico avanzato “R[®]” sono state evidenziate le regressioni tra variabili idrologiche e morfologiche. In questo capitolo saranno riassunti i risultati delle elaborazioni fatte, iniziando da quelle idrologiche per poi passare a quelle morfologiche. Successivamente si analizzeranno i *dataset* completo e semplificato dell’AICc, così da evidenziare quali siano le variabili che hanno una migliore risposta da un punto di vista della regressione statistica.

Nell’ultima parte saranno testate solo le variabili tempo (TIME) e la sommatoria delle portate che hanno superato l’alveo di piene rive (IDRO2) rispetto alle variazioni morfologiche dell’alveo attivo e della vegetazione riparia sia a scala di tratto e di sottotratto. La decisione della scelta di testare inizialmente solo queste variabili è basata sul fatto che oltre all’ottima risposta dal punto di vista statistico anche dalla semplicità di spiegazione del fenomeno.

7.1 - Analisi dei dati idrologici del fiume Brenta

Al fine di valutare la frequenza di accadimento, il tempo di ritorno di ogni evento è stato stimato sulla base dei valori massimi annuali della portata media giornaliera (Qd peak) disponibile dal 1924 al 2011 (79 anni idrologici completi). Diverse funzioni di distribuzione di probabilità (Log Normale, Log Pearson Tipo III, Frechet e Gumbel), sono state testate ed è stata scelta la distribuzione di Gumbel (OLS), per la migliore risposta al test Kolmogoroff. Tenendo in considerazione la distribuzione Gumbel ed i limiti di confidenza (è stato adottato un livello di confidenza del 90%), è stato possibile associare la probabilità di accadimento alla magnitudo degli eventi di piena. L’evento con portata formativa (TR = 1,5 anni) è stato calcolato in circa 350 m³/s (Q_{1,5}), che viene superato in media 2,4 giorni l’anno. La portata con tempo di ritorno di 10 anni è stato stimato a circa 750 m³/s.

L’evento di piena maggiore è stato registrato il 4 novembre 1966 con 1330 m³/s di portata media giornaliera (TR = 200 anni). La Figura 32 riporta l’idrogramma del Brenta registrato (1924 - 2011) presso la stazione di misura idrometrica di Barzizza (Bassano del Grappa, area di drenaggio = 1567 km²). Sono state evidenziate le portate medie giornaliere dal 1924 fino al giugno 2011 (Qd), le portate massime orarie registrati negli anni 1981 - 2011 (Qh peak), e la

media a confronto con le massime portate annuali per gli step temporali tra due foto aeree ($Q_{h\ peak_{mean}}$) 1981 - 2011.

L'analisi dei dati evidenzia che il regime di flusso del fiume Brenta è caratterizzato da piogge e contributi da scioglimento della neve in primavera e da piogge autunnali. La distribuzione mensile del regime di flusso mostra due massimi molto simili, uno concentrato a maggio e l'altro concentrato nei mesi di ottobre e novembre (Lenzi *et al*, 2010;.. Kaless *et al*, 2011.). Anche gli eventi di piena tendono a verificarsi in maggio, ottobre e novembre. In questi tre mesi si concentrano oltre il 50% di tutti gli eventi di piena registrati nella serie a tempo pieno, dal 1924 al 2011 (Lenzi *et al*, 2010;.. Kaless *et al*, 2011). Tuttavia, il mese con maggiore probabilità di verifica degli eventi di piena è sempre novembre. Nel corso degli ultimi trenta anni, ci sono stati quattro eventi di piena con tempo di ritorno pari o superiore a 10 anni (1980, 1996, 2002 e 2010). Altri anni di attività idrologica sono 1981, 1989, 1992, 1993, 1998, 2000 e 2009 con $Q_d\ peak$, rispettivamente di 569, 594, 682, 682, 691, 650 e 605 m^3/s . Due inondazioni gravi hanno colpito fiume Brenta a novembre e dicembre 2010. L'alluvione primo, causate da precipitazioni prolungate ed estese che hanno raggiunto i 300 mm con massimi locali superiore a 500 mm, sostenuto dal 31 ottobre al 2 novembre 2010, ha registrato un $Q_d = 720\ m^3/s$. Il secondo diluvio, originato da precipitazioni ad alta intensità si è verificato tra il 21 e il 26 dicembre 2010, soprattutto nella fase pre-alpina e nelle zone pedemontane, ed ha riportato un $Q_d = 759\ m^3/s$ ($Q_d\ peak$ del 2010). Le precipitazioni superano i 150 mm con massimi locali di 300 - 400 mm e il fiume registra (alla stazione di misurazione Barzizza) maggiori livelli idrometrici rispetto al primo evento di piena, probabilmente a causa della saturazione del suolo superiore alla scala di bacino e, in particolare, al mancato lavoro di laminazione della Diga del Corlo, già piena dalle inondazioni precedenti.

7.2 - Analisi dei dati morfologici del fiume brenta

L'andamento delle variazioni morfologiche del fiume Brenta nel medio e breve periodo, qui sintetizzate come variazione della superficie dell'alveo attivo, non è costante lungo tutto il tratto analizzato.

Anche se viene confermato il *pattern* di diminuzione nella prima decade in tutti e tre i sottotratti analizzati, successivamente si osserva (Figura 36 a) che a “Fontaniva” (sottotratto con il minor alveo attivo relativo) vi è un sostanziale equilibrio, mentre “Nove” e “Friola” riflettono l'andamento generale di tutto il tratto analizzato. Tuttavia, nel primo sottotratto la

seconda fase di diminuzione dell'alveo attivo è maggiore (circa 10%) ed inizia prima rispetto a quanto avviene a Friola (1999 e 2003).

L'estensione relativa delle isole fluviali (in rapporto alla superficie dell'alveo attivo) hanno un andamento altalenante nel periodo considerato. Si nota un netto aumento della vegetazione nella prima fase di restringimento dell'alveo (Figura 36 b), tuttavia alla minima estensione di quest'ultimo non corrisponde sempre la massima espansione di vegetazione, tranne nel caso del sottotratto "Nove". Gli unici periodi in cui si assiste ad una riduzione della vegetazione in tutti i sottotratti indagati sono 1999 - 2003 e 2008 - 2010 e 2011. Nel 2002 è stata registrata la massima portata di piena nel periodo analizzato (ad esclusione del 1980), pari a 756 m³/s con TR=11anni (IDROGRAMMA FIGURA 32).

Notevole è l'incremento di vegetazione che si è verificato nel sottotratto "Fontaniva" tra il 2003 ed il 2006: in soli tre anni le isole hanno colonizzato 6 ha di superficie precedentemente classificata come ghiaie esposte.

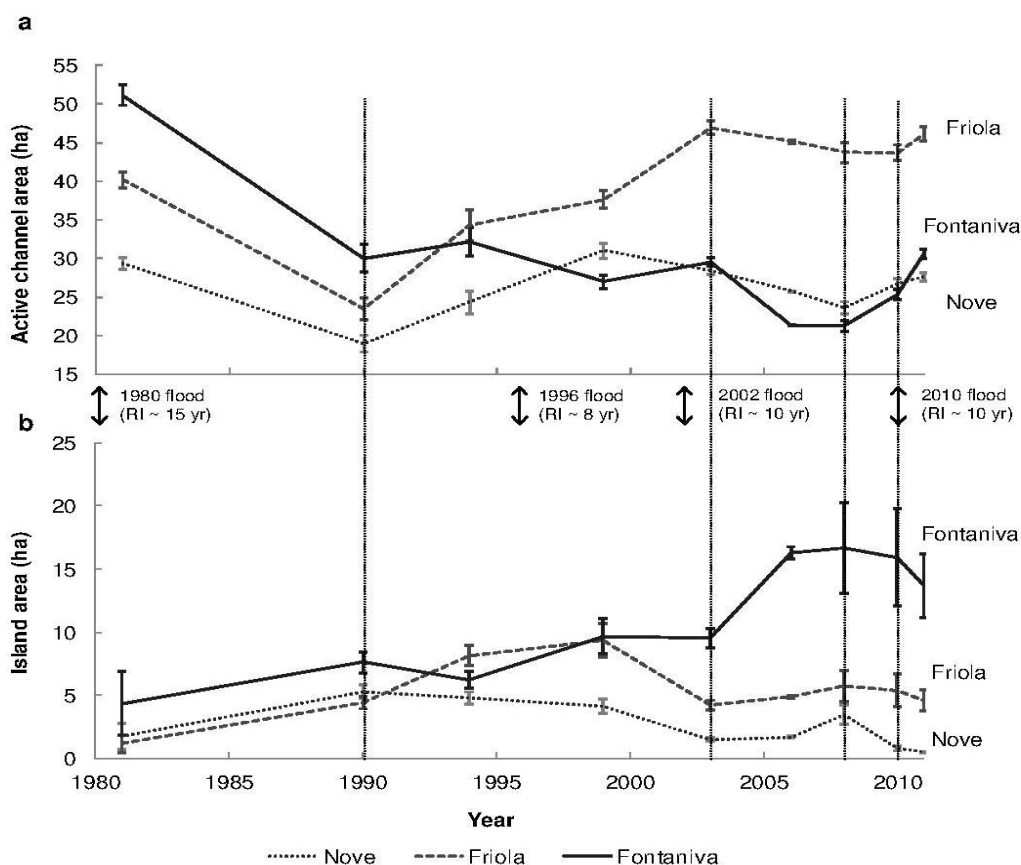


Figura 36 : Grafici di variazione a scala di sottotratto: (a) area del canale attivo in rapporto all'estensione del corridoio fluviale; (b) area delle isole fluviali in relazione al canale attivo.

Una visione più semplice del concetto su scala di sottotratto si ricava dalle immagini elaborate su supporto geografico georiferito dalla foto interpretazione e dai dati da esse ricavati. Nell'immagine sottostante (Figura 37) vediamo come si sono sviluppate le isole e come è variato l'alveo nel corso degli anni.

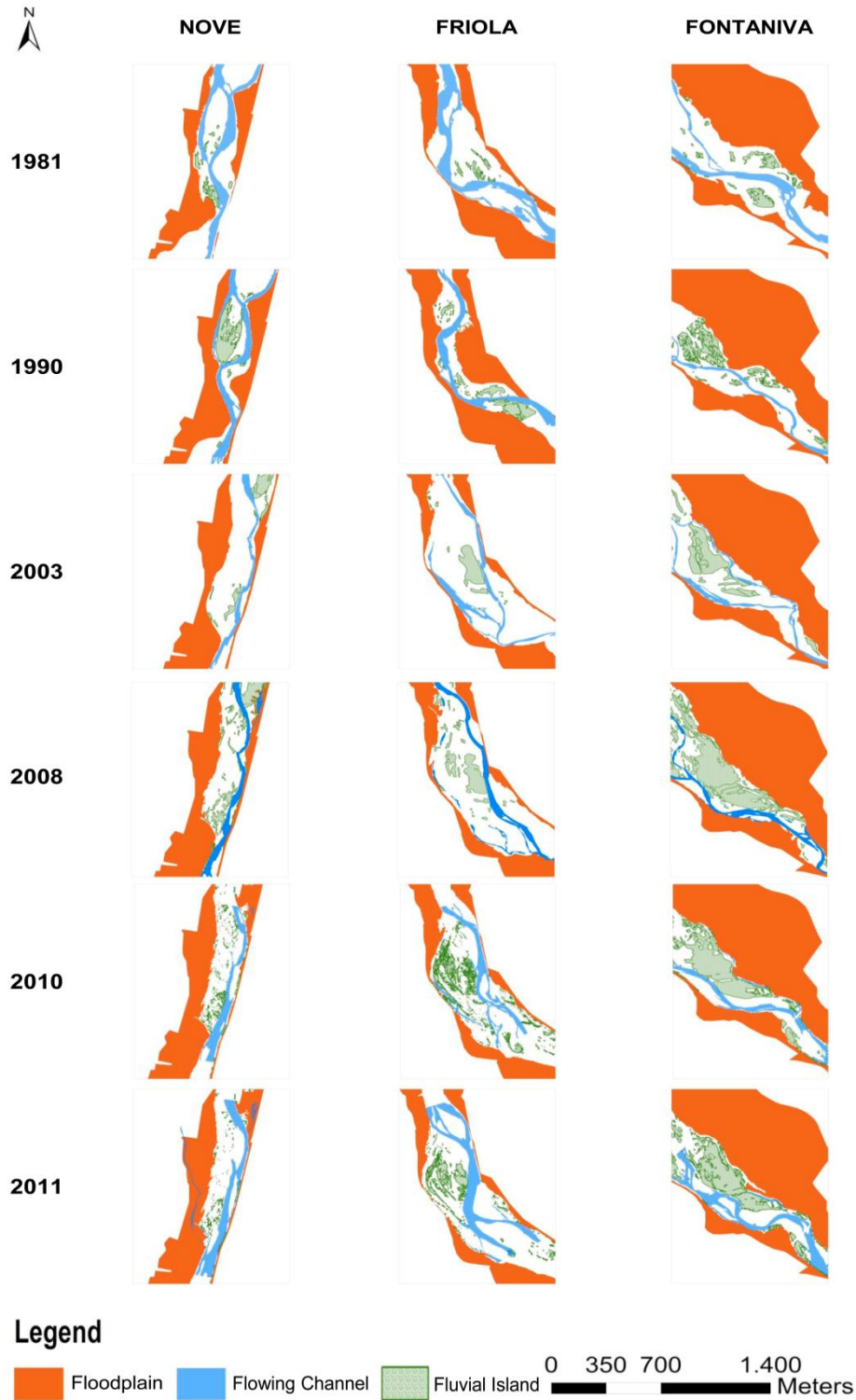


Figura 37 : Evoluzione dei sottotratti Nove, Friola e Fontaniva dal 1981 al 2011.

7.3 - Variabili idro - morfologiche a confronto

L'analisi delle foto aeree degli ultimi 30 anni evidenzia una variazione nella dimensione dell'alveo attivo. Nella figura 38 si può osservare l'evoluzione temporale della superficie relativa dell'alveo attivo (linea tratteggiata) in relazione alle portate massime annuali espresse in m^3/s (Q_{max}). La superficie relativa dell'alveo attivo è stata calcolata in rapporto all'area di pertinenza fluviale storica delimitata dagli argini. Nella prima decade (1981 - 1990) l'alveo attivo passando da 600 ha a 450 ha (-25%), registra la minima estensione storica. Questo periodo corrisponde ad una serie di eventi di piena ordinari, (media dei massimi eventi di piena annuali Q_{max} 1981 - 1990 = $330 m^3/s$). Nel periodo 1991 - 2003 vi è un'inversione di tendenza, con un aumento dell'alveo attivo prima del 10 % (fino al 1999) e poi di un ulteriore 8% in corrispondenza del 2003. In questi 12 anni si osserva un aumento degli eventi di piena più intensi (Q_{max} 1991 - 2003 = $500 m^3/s$ e 6 piene con $TR \geq 5$ anni). Negli anni più recenti (2003 - 2010) il trend cambia di nuovo come dimostra l'analisi multitemporale delle foto aeree che hanno una frequenza quasi biennale; l'alveo attivo riduce la superficie del 5% con un'estensione finale di 507 ha, che corrisponde a circa il 42% dell'intero corridoio fluviale. In questo ultimo periodo i deflussi diminuiscono la loro intensità (Q_{max} 2003 - 2010 = $440 m^3/s$), e nessun evento di piena con $TR \geq 4$ anni.

Nel periodo del 2011 vediamo che l'alveo attivo ha avuto un forte incremento della superficie, con il massimo tasso di crescita registrato in tutto il periodo analizzato. Anche in questo caso si può già notare una relazione inversa tra l'andamento dei deflussi e la variazione morfologica. Questa tendenza è stata analizzata approfonditamente attraverso i test statistici dell'AICc.

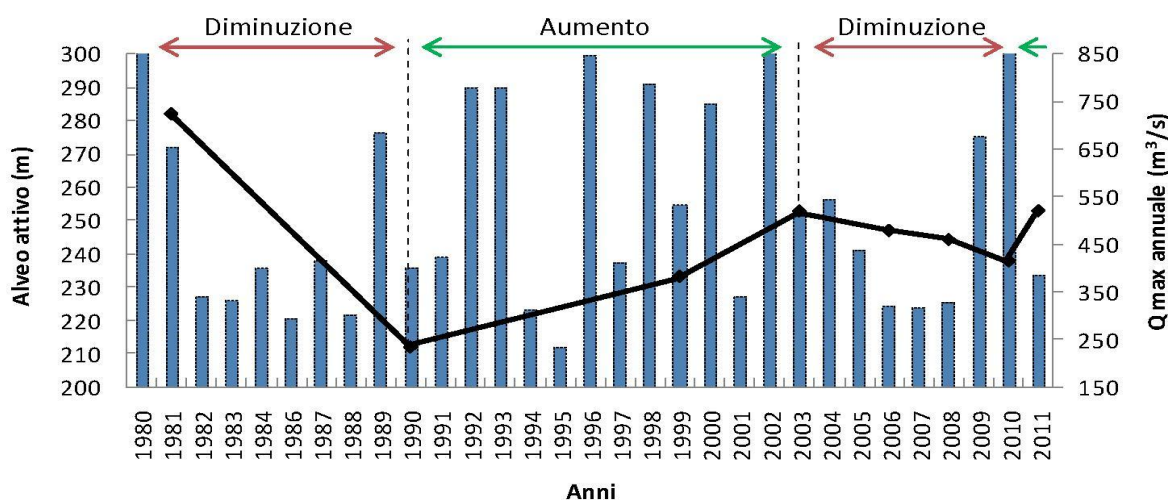


Figura 38 : Variazione temporale della superficie dell'alveo attivo e massimo annuale delle portate registrate nel tratto di Fiume Brenta analizzato

Nelle tabelle sottostanti (tabelle 6 e 8) sono stati riassunti i risultati ottenuti nell'elaborazione statistica del *dataset* semplificato e di quello esteso cioè con la ripetizione delle sequenze.

In queste tabelle nella prima colonna sono elencate le variabili morfologiche (Mx), nella seconda le variabili idrologiche (Hx) , nella terza colonna se è stata considerata la variabile tempo (T) e nelle colonne INT, H e T i coefficienti della miglior regressione ottenuta: intercetta, fattore di moltiplicazione per la variabile idrologica e per quella tempo. Infine nell'ultima colonna il valore di AIC_c ottenuto.

Ad esempio nell'analisi semplificata osservando la prima regressione analizzata risulta che:

$$MI = -10.18 + 4.342 HI - 0.0397 T$$

Il termine AIC_c indica il valore di quest'ultimo dato dalla selezione del modello per ogni applicazione (vedi cap. 6.7.1) .

La prima tabella (Tabella 6) riporta tutti i risultati delle analisi derivate dal *dataset* semplificato ovvero depurato da tutte le sovrapposizioni temporali.

Come possiamo osservare dalla tabella 7, tutti i test eseguiti hanno avuto una significatività statistica con valori di AIC_c compresi tra 45 e 120 . Notiamo che i valori maggiori di questo indice si hanno per le variabili morfologiche relative al tratto intero (MORFO 1 - 2 - 3 - 4) scendendo troviamo quelle riguardanti i sottotratti che interessano la variazione dei transetti (MORFO 8 - 12 - 16) , la differenza dell'alveo attivo al netto delle isole (MORFO 7 - 11 - 15), la variazione dell'alveo attivo (MORFO 5 - 9 - 13) e nella parte finale quelle riguardanti la variazione delle isole (MORFO 6 - 10 - 14).

Questi risultati evidenziano che la relazione a scala di sottotratto quindi in un contesto più contenuto è migliore rispetto alle analisi fatte a scala di tratto intero, molto probabilmente perché nella grande scala ci possono essere delle alterazioni localizzate non legate alle variabili idrologiche, come ad esempio gli interventi umani, che vanno a falsare la naturale dinamica fluviale e quindi ad aumentare la variabilità del modello, nel tratto intero infatti queste risultano meno controllabili e prevedibili. Per questo le variabili morfologiche riguardante il tratto intero hanno risposto con un AIC_c più alto rispetto ai sottotratti. Anche nel grafico a radar (Figura 39) che rappresenta il valore di AIC_c per le varie categorie morfologiche, si può notare molto bene che la miglior relazione di regressione per tutte le nove variabili idrologiche testate si ha con la MORFO 6, che riguarda la superficie di variazione delle isole con vegetazione arborea relativamente stabile nel sottotratto di Nove. Ovvero le variabili con AIC_c più basso rispetto alle altre indicano una minor componente stocastica

(dovute ad un numero minore di componenti sconosciuti al proprio interno). In altri termini sono in grado di spiegare maggiormente il fenomeno.

Guardando la variazione dell'AICc fra i diversi indici idrologici, a parità di variabile morfologica, si nota che questo valore non è molto accentuato, anche se si può osservare che la IDRO 3, 5, 8 e 9 riporta i maggiori valori. (Tabella 7 e figura 39).

Questi indici idrologici si riferiscono al numero di eventi con portata Q superiore a 1,5 anni come tempo di ritorno (TR) (IDRO 3), alla sommatoria della portata dell'evento maggiore eccedenti il $Q_{1,5}$ (IDRO 5), alla media giornaliera dell'evento maggiore (IDRO 8) ed al numero di giorni con una portata inferiore al 5% sommata al numero di giorni con portata (Q) superiore a quella con un magnitudo di 1,5 anni come tempo di ritorno (TR) (IDRO 9).

Per quanto riguarda invece gli indici con l'AICc più basso notiamo le IDRO 6 e 7 che sono 2 variabili composte che considerano la portata cumulata eccedente quella alla *bankfull*, la distanza degli eventi di piena dalla data dell'acquisizione della foto, e l'interdistanza tra due o più eventi di piena (sempre superiori alla *bankfull*). In altre parole viene confermato che non è solo la variabile portata ad influire sulla variazione morfologica, ma anche l'andamento degli eventi ha il suo peso. Più gli eventi sono distanti dalla fine del periodo, minore sarà l'influenza di questi nella modificazione morfologica. Al diminuire della distanza tra gli eventi corrisponde una diminuzione degli effetti cumulati. Questi indici composti dal tempo e dalla portata fusi in un unico numero capace di considerare anche la distanza temporale dalle piene al momento dell'acquisizione fotografica, se non utilizzati consapevolmente potrebbero trarre in inganno in merito ai confronti con le altre variabili. Infatti, con uno sguardo puramente "numerico", l'indice di AICc in queste variabili a confronto con le altre "rivali" è minore e quindi seguendo il ragionamento della metodologia potrebbero essere considerate migliori. Esiste però un importante fattore che non può essere trascurato: per definizione l'indice AICc varia in una funzione combinata fra il grado di esplicabilità di ogni variabile e il minor numero possibile di variabili utilizzate. Pertanto essendo "fusi" in un unico numero tempo e portata si confrontano modelli a una con modelli a due variabili. Quindi potenzialmente il minor valore di AICc potrebbe essere dato puramente dal metodo di calcolo di questo indice. Non avendo il tempo di verificare se queste variabili complesse hanno un indice migliore per motivi puramente metodologici e non fisici, abbiamo ritenuto opportuno anche per ragioni di semplicità esplicativa di scartare momentaneamente tali variabili.

Tabella 6 : Risultati analisi *dataset* semplificato.

TABELLA RISULTATI ANALISI "SEMPLIFICATA"													
V 1	V 2	V 3	INT	H	T	AICc	V 1	V 2	V 3	INT	H	T	AICc
M 1	H 1	T	-10.18	4.3420	-0.0397	99.4	M 9	H 1	T	-4.78	0.5480	-0.0012	75.6
M 1	H 2	T	-6.94	0.0291	-0.0419	96.6	M 9	H 2	T	-4.71	0.0040	-0.0017	73.4
M 1	H 3	T	2.31	7.9350	-0.0401	103.3	M 9	H 3	T	-2.55	0.7707	-0.0007	78
M 1	H 4	T	-17.04	0.0342	-0.0267	99.7	M 9	H 4	T	-5.81	0.0045	0.0004	75.5
M 1	H 5	T	-12.10	0.0722	-0.0266	101	M 9	H 5	T	-4.64	0.0084	0.0005	76.7
M 1	H 6		-52.11	0.0471		88.8	M 9	H 6		-4.01	0.0058		62.6
M 1	H 7		-52.04	0.0404		89	M 9	H 7		-5.09	0.0059		61.9
M 1	H 8	T	-46.25	0.1098	-0.0223	103.4	M 9	H 8	T	-10.06	0.0150	0.0009	77.7
M 1	H 9	T	22.80	-0.1476	-0.0083	104.2	M 9	H 9	T	-0.74	-0.0279	0.0035	78.3
M 2	H 1	T	-18.23	-1.4110	0.0355	84.6	M 10	H 1	T	-0.48	-0.1842	0.0024	54.3
M 2	H 2	T	-23.42	-0.0057	0.0336	87.2	M 10	H 2	T	-1.11	-0.0008	0.0021	57.2
M 2	H 3	T	-13.29	-5.7580	0.0433	83.4	M 10	H 3	T	-0.08	-0.6654	0.0032	54.9
M 2	H 4	T	-20.64	-0.0073	0.0307	87.4	M 10	H 4	T	-0.57	-0.0011	0.0018	56.9
M 2	H 5	T	-14.74	-0.0291	0.0317	83.7	M 10	H 5	T	0.09	-0.0040	0.0019	51.8
M 2	H 6		28.53	-0.0128		84.9	M 10	H 6		2.34	-0.0020		47.1
M 2	H 7		22.01	-0.0049		85.2	M 10	H 7		1.99	-0.0014		47.9
M 2	H 8	T	20.95	-0.0781	0.0303	84.3	M 10	H 8	T	0.83	-0.0043	0.0016	58.8
M 2	H 9	T	-24.57	0.3795	-0.0034	88	M 10	H 9	T	-1.66	0.0231	-0.0004	59.3
M 3	H 1	T	-95.64	10.0900	-0.0088	117.7	M 11	H 1	T	-4.27	0.7312	-0.0036	73.2
M 3	H 2	T	-96.64	0.0755	-0.0197	115.6	M 11	H 2	T	-3.57	0.0048	-0.0039	70.5
M 3	H 3	T	-55.67	14.5700	-0.0007	119.7	M 11	H 3	T	-2.45	1.4360	-0.0039	77.5
M 3	H 4	T	-117.40	0.0843	0.0205	117.5	M 11	H 4	T	-5.22	0.0056	-0.0014	73.9
M 3	H 5	T	-90.15	0.1483	0.0230	118.8	M 11	H 5	T	-4.70	0.0124	-0.0014	74.8
M 3	H 6		-60.98	0.1078		104.8	M 11	H 6		-6.35	0.0077		61.1
M 3	H 7		-84.51	0.1143		104	M 11	H 7		-7.07	0.0073		60.5
M 3	H 8	T	-228.10	0.3304	0.0308	119.2	M 11	H 8	T	-10.85	0.0193	-0.0007	77.7
M 3	H 9	T	-24.77	-0.7822	0.1021	120	M 11	H 9	T	0.94	-0.0509	0.0039	78.6
M 4	H 1	T	-5.78	2.1070	-0.0188	89.1	M 12	H 1	T	-38.70	4.5910	-0.0116	103.6
M 4	H 2	T	-4.14	0.0141	-0.0198	86.3	M 12	H 2	T	-37.49	0.0328	-0.0155	100.9
M 4	H 3	T	0.22	3.8710	-0.0190	93.1	M 12	H 3	T	-21.40	6.9470	-0.0087	106.4
M 4	H 4	T	-9.12	0.0166	-0.0125	89.3	M 12	H 4	T	-48.29	0.0381	0.0018	103.3
M 4	H 5	T	-6.79	0.0352	-0.0124	90.7	M 12	H 5	T	-38.80	0.0726	0.0024	104.8
M 4	H 6		-25.40	0.0229		78.4	M 12	H 6		-36.19	0.0505		90.6
M 4	H 7		-25.44	0.0197		78.6	M 12	H 7		-44.10	0.0506		89.7
M 4	H 8	T	-24.10	0.0545	-0.0104	93.1	M 12	H 8	T	-75.49	0.1140	0.0067	106.3
M 4	H 9	T	11.14	-0.0016	-0.0096	94	M 12	H 9	T	-0.51	0.0953	-0.0004	106.9
M 5	H 1	T	-2.66	0.0998	0.0005	70.7	M 13	H 1	T	1.68	0.3781	-0.0056	65.7
M 5	H 2	T	-3.28	0.0013	0.0000	69.7	M 13	H 2	T	2.06	0.0024	-0.0058	63.9
M 5	H 3	T	-1.37	-0.1729	0.0013	70.8	M 13	H 3	T	2.56	0.7635	-0.0059	69.2
M 5	H 4	T	-3.41	0.0013	0.0007	70.3	M 13	H 4	T	1.35	0.0028	-0.0045	66.7
M 5	H 5	T	-2.02	0.0003	0.0009	70.9	M 13	H 5	T	1.51	0.0063	-0.0045	67.2
M 5	H 6		-1.59	0.0013		57	M 13	H 6		-5.17	0.0039		59.5
M 5	H 7		-2.15	0.0016		56.7	M 13	H 7		-4.67	0.0028		59.9
M 5	H 8	T	-4.30	0.0038	0.0009	70.8	M 13	H 8	T	-2.36	0.0110	-0.0041	69.2
M 5	H 9	T	-2.31	-0.0344	0.0039	70.8	M 13	H 9	T	3.69	-0.0783	0.0028	69.7
M 6	H 1	T	0.49	-0.1847	0.0013	49.4	M 14	H 1	T	0.90	-0.1360	0.0016	58.9
M 6	H 2	T	0.11	-0.0010	0.0012	50.8	M 14	H 2	T	0.82	-0.0009	0.0016	57.9
M 6	H 3	T	0.70	-0.5999	0.0020	52.5	M 14	H 3	T	1.06	-0.4442	0.0020	59.4
M 6	H 4	T	0.52	-0.0012	0.0007	53	M 14	H 4	T	1.52	-0.0014	0.0012	57.2
M 6	H 5	T	0.72	-0.0034	0.0008	50.9	M 14	H 5	T	1.12	-0.0026	0.0012	59
M 6	H 6		1.55	-0.0019		40.4	M 14	H 6		3.40	-0.0022		45.1
M 6	H 7		1.57	-0.0016		40.6	M 14	H 7		3.16	-0.0017		46.1
M 6	H 8	T	4.24	-0.0081	0.0006	53.4	M 14	H 8	T	-0.26	0.0001	0.0010	60.8
M 6	H 9	T	-0.06	0.0710	-0.0057	54.5	M 14	H 9	T	0.75	0.0716	-0.0052	58.9
M 7	H 1	T	-3.15	0.2846	-0.0008	72.3	M 15	H 1	T	0.78	0.5156	-0.0072	67.7
M 7	H 2	T	-3.38	0.0023	-0.0013	70.8	M 15	H 2	T	1.25	0.0034	-0.0074	64.6
M 7	H 3	T	-2.07	0.4270	-0.0006	73.4	M 15	H 3	T	1.51	1.2080	-0.0079	71.7
M 7	H 4	T	-3.92	0.0025	0.0000	72	M 15	H 4	T	-0.16	0.0042	-0.0057	67.6
M 7	H 5	T	-2.74	0.0037	0.0001	73.1	M 15	H 5	T	0.38	0.0089	-0.0057	69.3
M 7	H 6		-3.14	0.0031		58.7	M 15	H 6		-8.56	0.0061		61.7
M 7	H 7		-3.73	0.0032		58.3	M 15	H 7		-7.82	0.0045		62.5
M 7	H 8	T	-8.54	0.0119	0.0003	72.9	M 15	H 8	T	-1.96	0.0107	-0.0051	72.9
M 7	H 9	T	-2.25	-0.1054	0.0096	73	M 15	H 9	T	2.92	-0.1522	0.0082	72.1
M 8	H 1	T	-17.95	0.5281	0.0057	97.8	M 16	H 1	T	15.35	2.1050	-0.0382	89.2
M 8	H 2	T	-22.63	0.0082	0.0021	97	M 16	H 2	T	17.34	0.0137	-0.0390	87
M 8	H 3	T	-8.37	-1.8860	0.0125	97.8	M 16	H 3	T	19.33	4.5820	-0.0402	92.7
M 8	H 4	T	-23.06	0.0077	0.0067	97.5	M 16	H 4	T	12.90	0.0159	-0.0318	89.9
M 8	H 5	T	-13.24	-0.0009	0.0080	97.9	M 16	H 5	T	14.44	0.0350	-0.0319	90.8
M 8	H 6		-7.61	0.0069		84.3	M 16	H 6		-34.28	0.0224		85.6
M 8	H 7		-11.83	0.0098		84	M 16	H 7		-29.63	0.0149		86.1
M 8	H 8	T	-24.08	0.0161	0.0078	97.9	M 16	H 8	T	-10.34	0.0659	-0.0299	92.7
M 8	H 9	T	-16.07	-0.1796	0.0236	97.9	M 16	H 9	T	25.87	-0.4866	0.0131	93.3

Il termine V sta per Variabile indicano le variabili considerate, il termine M sta per Morfo indicante il numero della variabile morfologica, il termine H sta per Idro indicante il numero della variabile idrologica; il termine T sta per Time indicante il valore della variabile tempo.

Tabella 7: Valori di AICc per ogni variabile, derivante dalla tabella risultati semplificata, in ordine decrescente .

SIGNIFICATIVITA'	AICc	IDRO 1	IDRO 2	IDRO 3	IDRO 4	IDRO 5	IDRO 6	IDRO 7	IDRO 8	IDRO 9
MINORE ↓ MAGGIORE	MORFO 3	117.7	115.6	119.7	117.5	118.8	104.8	104	119.2	120
	MORFO 12	103.6	100.9	106.4	103.3	104.8	90.6	89.7	106.3	106.9
	MORFO 1	99.4	96.6	103.3	99.7	101	88.8	89	103.4	104.2
	MORFO 4	97.8	97	97.8	97.5	97.9	84.3	84	97.9	97.9
	MORFO 16	89.2	87	92.7	89.9	90.8	85.6	86.1	92.7	93.3
	MORFO 4	89.1	86.3	93.1	89.3	90.7	78.4	78.6	93.1	94
	MORFO 2	84.6	87.2	83.4	87.4	83.7	84.9	85.2	84.3	88
	MORFO 9	75.6	73.4	78	75.5	76.7	62.6	61.9	77.7	78.3
	MORFO 11	73.2	70.5	77.5	73.9	74.8	61.1	60.5	77.7	78.6
	MORFO 7	72.3	70.8	73.4	72	73.1	58.7	58.3	72.9	73
	MORFO 8	70.7	69.7	70.8	70.3	70.9	57	56.7	70.8	70.8
	MORFO 15	67.7	64.6	71.7	67.6	69.3	61.7	62.5	72.9	72.1
	MORFO 13	65.7	63.9	69.2	66.7	67.2	59.5	59.9	69.2	69.7
	MORFO 14	58.9	57.9	59.4	57.2	59	45.1	46.1	60.8	58.9
	MORFO 10	54.3	57.2	54.9	56.9	51.8	47.1	47.9	58.8	59.3
	MORFO 6	49.4	50.8	52.5	53	50.9	40.4	40.6	53.4	54.5

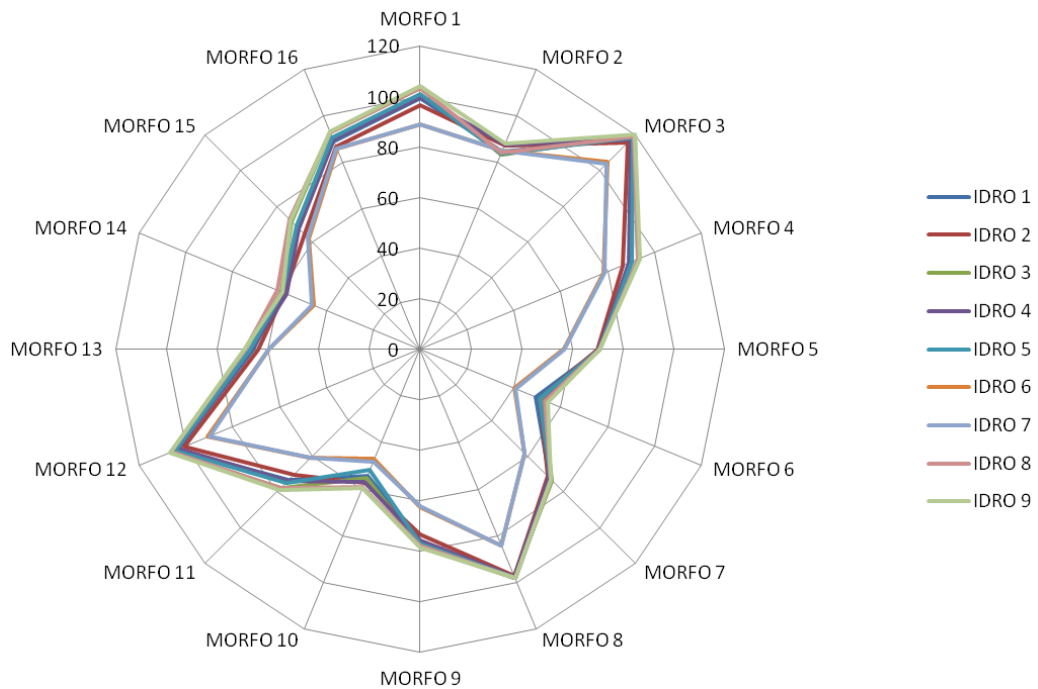


Figura 39 : Grafico raffigurante i valori di AICc a confronto dalla tabella risultati semplificata.

Nella tabella sottostante (Tabella 8) sono riportati i parametri caratteristici delle regressioni tra variabili morfologiche ed idrologiche delle sequenze temporali ripetute, ovvero per 28 combinazioni temporali. Si osserva che in questo caso non tutti i test eseguiti hanno avuto un risultato positivo, mentre i valori di AICc sono nettamente superiori rispetto ai risultati del *dataset* semplificato (Figura 40). Queste evidenze sono legate al maggior numero di coppie di variabili (solo 7 sequenze temporali nel primo *dataset*) e alla ripetizione dei dati stessi. Osservando anche il grafico a radar in figura 41 possiamo notare che i risultati delle prove significative ottenuti rispondono alla stessa maniera del *dataset* semplificato solamente con valori sia a livello di AICc che di coefficienti più alti. Anche in questo caso la variabile morfologica con la migliore relazione di regressione è la sesta, mentre la variabile idrologica che riporta mediamente il più alto valore di AICc è la numero otto.

Tabella 8: Risultati analisi *dataset* completo.

TABELLA RISULTATI ANALISI "COMPLETA"													
V 1	V 2	V 3	INT	H	T	AICc	V 1	V 2	V 3	INT	H	T	AICc
M 1	H 1	T	-3.05	4.2200	-0.0413	285	M 10	H 1	T	-0.29	-0.2030	0.0022	112
M 1	H 2	T	2.39	0.0278	-0.0412	280	M 10	H 2	T	-0.77	-0.0010	0.0018	128
M 1	H 3	T	-0.21	9.8450	-0.0418	304	M 10	H 3	T	-0.10	-0.6141	0.0027	121
M 1	H 4	T	-11.04	0.0262	-0.0155	304	M 10	H 4	T	-0.29	-0.0010	0.0009	138
M 2	H 1	T	7.82	-1.5710	0.0166	266	M 10	H 5	T	0.40	-0.0031	0.0008	136
M 2	H 2	T	4.70	-0.0088	0.0146	269	M 10	H 6	T	1.01	-0.0002		150
M 2	H 3	T	9.08	-4.6640	0.0204	269	M 10	H 7	T	0.03	0.0003		150
M 2	H 4	T	6.18	-0.0061	0.0056	276	M 10	H 8	T	3.56	-0.0072	0.0005	143
M 2	H 6	T	12.77	0.0002		279	M 10	H 9	T	-0.94	0.0348	-0.0024	142
M 2	H 7	T	8.94	0.0018		278	M 11	H 1	T	-2.47	0.5799	-0.0039	188
M 3	H 1	T	21.41	6.5020	-0.0649	358	M 11	H 2	T	-1.83	0.0040	-0.0040	181
M 3	H 2	T	24.38	0.0502	-0.0742	353	M 11	H 3	T	-1.58	1.1370	-0.0031	204
M 3	H 3	T	37.39	10.1500	-0.0473	365	M 11	H 4	T	-3.29	0.0034	-0.0002	202
M 3	H 4	T	-3.78	0.0503	-0.0289	360	M 11	H 5	T	-4.84	0.0094	0.0002	202
M 3	H 7	T	-14.24	0.0132		364	M 11	H 6	T	-0.50	0.0041		206
M 3	H 8	T	-168.10	0.3257	-0.0122	365	M 11	H 7	T	-3.64	0.0040		199
M 3	H 9	T	60.59	-0.0171	-0.0086	366	M 12	H 1	T	-25.39	3.0950	-0.0137	310
M 4	H 1	T	-2.68	2.0000	-0.0194	245	M 12	H 2	T	-24.03	0.0240	-0.0183	303
M 4	H 2	T	-0.12	0.0132	-0.0194	240	M 12	H 3	T	-16.24	4.1660	-0.0029	318
M 4	H 3	T	-0.96	4.5040	-0.0190	264	M 12	H 4	T	-31.80	0.0196	0.0050	315
M 4	H 4	T	-5.92	0.0120	-0.0070	264	M 12	H 5	T	-42.00	0.0568	0.0075	315
M 4	H 5	T	-5.78	0.0245	-0.0046	269	M 12	H 6	T	1.89	0.0313		322
M 4	H 9	T	6.38	-0.1831	0.0126	273	M 12	H 7	T	-31.92	0.0351		312
M 5	H 1	T	-1.35	0.0004	0.0000	173	M 12	H 8	T	-78.77	0.1026	0.0117	319
M 5	H 2	T	-1.76	0.0006	-0.0007	171	M 12	H 9	T	-1.14	0.3240	-0.0143	319
M 5	H 3	T	-0.86	-0.2102	0.0008	172	M 13	H 1	T	2.19	0.5085	-0.0059	165
M 5	H 4	T	-2.38	0.0008	-0.0003	171	M 13	H 2	T	3.06	0.0030	-0.0055	170
M 5	H 5	T	-0.70	-0.0010	0.0001	172	M 13	H 3	T	1.81	1.4990	-0.0071	175
M 5	H 8	T	-2.00	0.0009	0.0000	173	M 13	H 4	T	1.10	0.0033	-0.0029	184
M 5	H 9	T	-1.39	-0.0026	0.0003	173	M 13	H 5	T	3.59	0.0027	-0.0019	195
M 6	H 1	T	0.05	-0.1755	0.0014	82	M 13	H 6	T	-3.72	0.0011		207
M 6	H 2	T	-0.24	-0.0011	0.0013	91	M 13	H 8	T	-9.98	0.0217	-0.0018	194
M 6	H 3	T	0.19	-0.5187	0.0019	101	M 13	H 9	T	2.44	-0.1681	0.0122	185
M 6	H 4	T	0.46	-0.0011	0.0004	114	M 14	H 1	T	0.57	-0.0647	0.0016	144
M 6	H 6	T	0.64	-0.0012		119	M 14	H 2	T	0.66	-0.0007	0.0019	141
M 6	H 7	T	0.64	-0.0008		120	M 14	H 3	T	0.78	-0.2586	0.0020	143
M 6	H 8	T	5.62	-0.0093		123	M 14	H 4	T	2.06	-0.0015	0.0016	130
M 6	H 9	T	-0.13	0.0525	-0.0044	119	M 14	H 5	T	-0.22	0.0006	0.0010	146
M 7	H 2	T	-1.50	0.0016	-0.0020	173	M 14	H 8	T	-0.72	0.0013	0.0010	146
M 7	H 3	T	-1.03	0.3109	-0.0011	182	M 14	H 9	T	1.14	0.0566	-0.0036	138
M 7	H 5	T	-0.85	0.0009	0.0000	182	M 15	H 1	T	1.62	0.5739	-0.0075	169
M 7	H 8	T	-7.67	0.0105	0.0000	182	M 15	H 2	T	2.41	0.0037	-0.0074	165
M 7	H 9	T	-1.25	-0.0557	0.0047	181	M 15	H 3	T	5.10		-0.0027	199
M 8	H 1	T	-8.87	-0.1333	0.0026	281	M 15	H 4	T	-0.96	0.0047	-0.0045	176
M 8	H 2	T	-11.94	0.0031	-0.0025	280	M 15	H 5	T	3.82	0.0021	-0.0029	202
M 8	H 3	T	-5.32	-1.8810	0.0084	280	M 15	H 8	T	-9.12	0.0202	-0.0028	200
M 8	H 4	T	-15.61	0.0046	-0.0002	280	M 15	H 9	T	1.31	-0.2252	0.0159	183
M 8	H 5	T	-3.98	-0.0091	0.0023	281	M 16	H 1	T	16.72	3.1120	-0.0400	268
M 8	H 8	T	-7.63	-0.0029	0.0015	281	M 16	H 2	T	22.18	0.0185	-0.0374	273
M 8	H 9	T	-9.51	0.0099	0.0007	281	M 16	H 3	T	12.92	9.8050	-0.0497	273
M 9	H 1	T	-2.75	0.3777	-0.0017	194	M 16	H 4	T	8.22	0.0213	-0.0217	284
M 9	H 2	T	-2.59	0.0029	-0.0022	188	M 16	H 5	T	29.92	0.0091	-0.0145	298
M 9	H 3	T	-1.67	0.5248	-0.0004	202	M 16	H 6	T	-32.30	0.0044		317
M 9	H 4	T	-3.57	0.0024	0.0006	199	M 16	H 8	T	-59.87	0.1358	-0.0147	296
M 9	H 5	T	-4.43	0.0064	0.0010	200	M 16	H 9	T	15.91	-1.1690	0.0827	282
M 9	H 6	T	0.52	0.0039		206							
M 9	H 7	T	-3.60	0.0043		196							
M 9	H 8	T	-10.61	0.0144	0.0014	203							
M 9	H 9	T	-0.26	0.0120	0.0005	204							

Il termine V sta per Variabile indicano le variabili considerate, il termine M sta per Morfo indicante il numero della variabile morfologica, il termine H sta per Idro indicante il numero della variabile idrologica; il termine T sta per Time indicante il valore della variabile tempo.

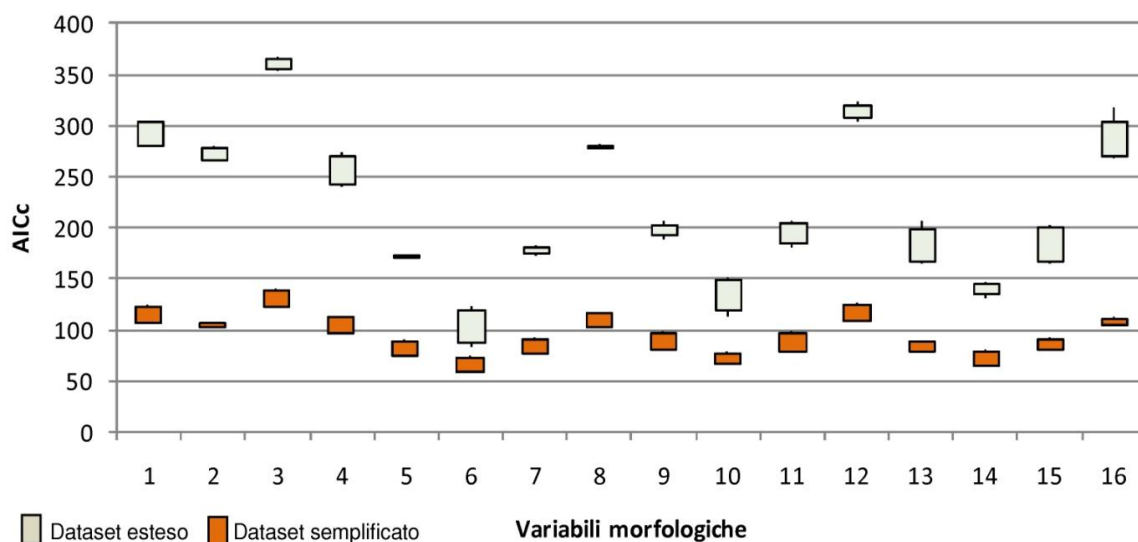


Figura 40: Box plot del valore di AICc a confronto per le diverse variabili morfologiche e *dataset*. I Box rappresentano l'intervallo tra il 10° ed il 90° percentile di distribuzione del valore. I baffi comprendono il minimo ed il massimo.

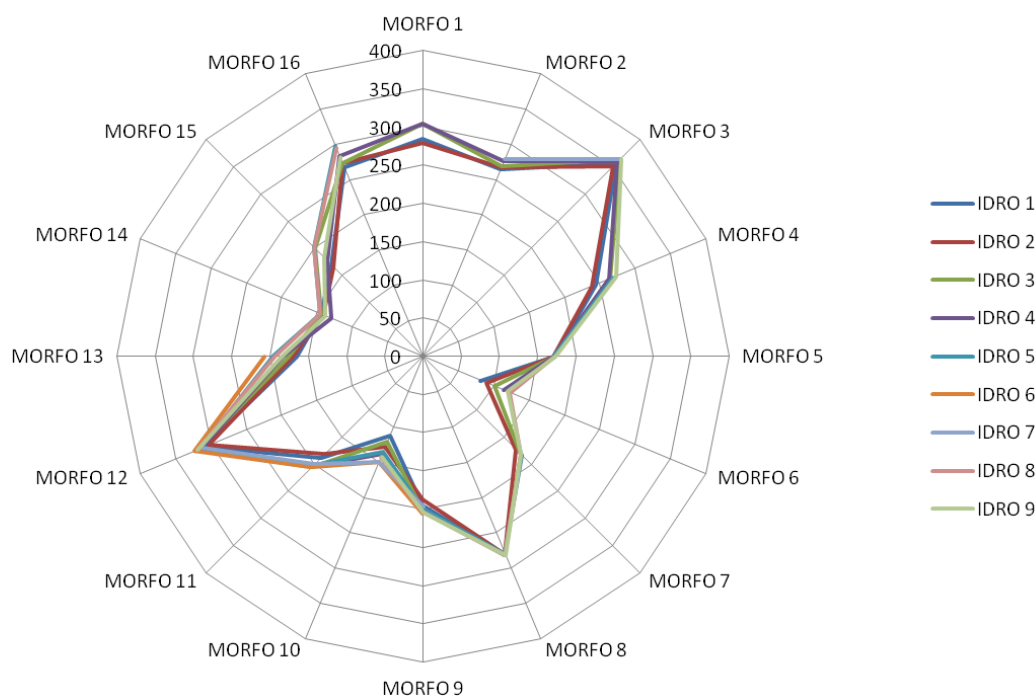


Figura 41: Grafico raffigurante i valori di AICc a confronto dalla tabella risultati completa.

Osservando le tabelle dei risultati (Tabelle 6 e 8) ed in accordo con la teoria delle classi della formazione dei *dataset* statistici (ogni campione deve essere indipendente – “replica”) i risultati ottenuti dal *dataset* depurati dalle sovrapposizioni temporali (Tabella 6) hanno risposto con un valore di AICc minore. Pertanto tutte le analisi e considerazioni successive saranno effettuate considerando questi risultati. E’ da notare comunque che a livello di tendenza generale i risultati non sono contrastanti.

Dal punto di vista idrologico - morfologico la variabile “Tempo” TIME, intesa come numero di giorni trascorsi, e la variabile idrologica “Portata” IDRO 2, intesa come sommatoria delle portate superiori a quelle con un tempo di ritorno di 1.5 anni, hanno risposto significativamente alle prova dell’ AICc. In questa prima fase di sperimentazione sono le due variabili che potenzialmente riescono a spiegare nella maniera più semplice il concetto di “dinamica fluviale”.

7.4 - Analisi effetto portata - tempo su diversa scala spaziale e temporale

Dal punto di vista morfologico abbiamo scelto per ora di rappresentare le variabili idrologiche nel tratto intero e nei sottotratti nella differenza dell'alveo attivo e nella differenza delle isole anche qui per semplicità di spiegazione dei concetti. Le analisi e le comparazioni dei risultati ottenuti vanno effettuate a livello di segno (positivo o negativo) nel modello stimato scelto e a livello di coefficiente per verificarne i rapporti.

7.4.1 - Effetti sull'alveo attivo

Analizzando i modelli risultati dall'applicazione dell'AICc con l'utilizzo della variabile che maggiormente ha significatività statistica sembra che la variazione morfologica sia correlata sia con il tempo che con la portata. Nello specifico con la somma delle portate superiori a 1.5 anni di tempo di ritorno.

Basandoci sulla tabella 9 riusciamo a spiegarne meglio il tutto.

Tabella 9 : Confronto tra *dataset* completo e semplificato riguardanti l'alveo attivo delle variabili considerate.

TABELLA RISULTATI DIFFERENZA ALVEO ATTIVO "SEMPLIFICATA"

TRATTO DI RIFERIMENTO	VAR 1	VAR 2	VAR 3	INTRC	IDRO	TIME	AICc
TRATTO INTERO	MORFO 1	IDRO 2	TIME	-6.942	0.02911	-0.04191	96.6
NOVE	MORFO 5	IDRO 2	TIME	-3.275	0.001303	-0.00001695	69.7
FRIOLA	MORFO 9	IDRO 2	TIME	-4.707	0.003985	-0.001747	73.4
FONTANIVA	MORFO 13	IDRO 2	TIME	2.061	0.002445	-0.005778	63.9

TABELLA RISULTATI DIFFERENZA ALVEO ATTIVO "COMPLETA"

TRATTO DI RIFERIMENTO	VAR 1	VAR 2	VAR 3	INTRC	IDRO	TIME	AICc
TRATTO INTERO	MORFO 1	IDRO 2	TIME	2.394	0.02777	-0.04118	279.6
NOVE	MORFO 5	IDRO 2	TIME	-1.764	0.000569	-0.0006798	171.3
FRIOLA	MORFO 9	IDRO 2	TIME	-2.591	0.002936	-0.002223	187.9
FONTANIVA	MORFO 13	IDRO 2	TIME	3.063	0.003044	-0.005537	169.8

Prendiamo in considerazione la prima delle 2 tabelle, la prima riga ed in particolare la colonna IDRO e TIME che sono le nostre variabili scelte. Possiamo vedere, guardando il segno dei modelli, che la Portata (intesa come IDRO) è positiva (+) il che ci fa pensare ad un allargamento (essendo positivo) dell'alveo all'aumentare della portata. Allo stesso modo guardando il Tempo (inteso come TIME) vediamo che è negativo (-) quindi ci fa pensare ad un restringimento dell'alveo (essendo negativo) al suo aumentare. Possiamo affermare che

all'aumentare della portate (intesa come sommatoria delle portate) corrisponde una variazione positiva dell'alveo attivo, un allargamento magari dovuto all'erosione; mentre l'aumentare del tempo comporta un generale restringimento dell'alveo.

Schematicamente potremmo così riassumere : il tempo fa diminuire (-) la portata fa allargare (+).

Questo se prendiamo i parametri singolarmente; ipotizzando di prenderli assieme IDRO + TIME - potremmo ipotizzare che con una forte portata abbinata ad un breve tempo avremmo una situazione di allargamento (la portata porta all'allargamento, il tempo in questo caso non va a contrastare la portata per cui avremmo allargamento), viceversa se abbiamo una portata debole e un tempo molto lungo avremmo una situazione di restringimento (in questo caso è la portata che non va a contrastare il tempo perché essa è poca per cui avremmo restringimento). Se avremmo tanta portata in tanto tempo ci troveremo davanti una situazione di equilibrio dell'alveo perché la portata tenta di allargare, il tempo, favorendo l'instaurarsi della vegetazione e di conseguenza il deposito di materiale, di restringere per ciò si equipareranno.

Un ultima cosa da notare che mi ha dato soddisfazione è che la teoria risponde molto bene sia a livello di tratto intero che di sottotratti. Anche su questi infatti IDRO è positiva e TIME è negativo.

Se volessimo controllare più in profondità i parametri dovremmo guardare i valori che compongono le varie caselle; Per esempio confrontando i coefficienti delle relazioni a livello di sottotratto, sembra che il tempo sia molto più influente a Fontaniva e a Friola, che sono abbastanza vicini, rispetto che a Nove (un valore nettamente inferiore) . Questo significa che a parità di tempo trascorso l'alveo attivo di Fontaniva e Friola tenderà a restringersi maggiormente di quando avvenga a Nove.

7.4.2 - Effetti sulle Isole fluviali

Prendendo ora in considerazione le variabili morfologiche riferite alla differenza delle isole fluviali nel tratto intero e nei sottotratti andremo a spiegare cosa comportano in esse la Portata ed il Tempo; Analizziamo anche qui la tabella per capire meglio la spiegazione :

Tabella 10 : Confronto tra *dataset* completo e semplificato riguardanti la differenza delle isole nelle variabili considerate.

TABELLA RISULTATI DIFFERENZA DI ISOLE " SEMPLIFICATA "

TRATTO DI RIFERIMENTO	VAR 1	VAR 2	VAR 3	INTRC	IDRO	TIME	AICc
TRATTO INTERO	MORFO 2	IDRO 2	TIME	-23.42	-0.00565	0.03357	87.2
NOVE	MORFO 6	IDRO 2	TIME	0.1087	-0.00101	0.00124	50.8
FRIOLA	MORFO 10	IDRO 2	TIME	-1.108	-0.00078	0.00214	57.2
FONTANIVA	MORFO 14	IDRO 2	TIME	0.8186	-0.00093	0.001641	57.9

TABELLA RISULTATI DIFFERENZA DI ISOLE "COMPLETA"

TRATTO DI RIFERIMENTO	VAR 1	VAR 2	VAR 3	INTRC	IDRO	TIME	AICc
TRATTO INTERO	MORFO 2	IDRO 2	TIME	4.702	-0.00884	0.01462	268.6
NOVE	MORFO 6	IDRO 2	TIME	-0.2368	-0.00107	0.001323	90.5
FRIOLA	MORFO 10	IDRO 2	TIME	-0.7686	-0.00104	0.001826	127.5
FONTANIVA	MORFO 14	IDRO 2	TIME	0.6568	-0.00065	0.001875	140.6

Guardiamo sempre le nostre righe e le colonne IDRO e TIME. Prendiamo in considerazione per ora il tratto intero per cui la prima riga. Possiamo vedere guardando il segno dei coefficienti che in questo caso la Portata (intesa come IDRO) è negativa (-) il che ci fa pensare ad una diminuzione della superficie delle isole. Allo stesso modo guardando il Tempo (inteso come TIME) vediamo che è positivo (+) quindi ci fa pensare ad un aumento della superficie delle isole.

In altri termini potremmo dire che all'aumentare della portate (intesa come sommatoria delle portate al di sopra della *Bankfull*) corrisponde una diminuzione della superficie delle isole, essa quindi tende ad eroderle, mentre l'aumentare del tempo comporta una germogliazione di piante e quindi un allargamento della superficie delle isole dovuto sia alla vegetazione che all'abbassamento del livello idrico.

Schematicamente potremmo così riassumere : il tempo fa aumentare (+) la portata fa diminuire (-).

Se andiamo anche qui ad ipotizzare di prendere i parametri assieme IDRO - TIME + potremmo ipotizzare che con una forte portata abbinata ad un breve tempo avremmo una situazione di pochissime isole (la portata porta alla diminuzione, il tempo in questo caso non va a contrastare la portata per cui avremmo poche isole), viceversa se abbiamo una portata debole e un tempo molto lungo avremmo una situazione di un aumento delle isole e in certo senso anche di vegetazione (in questo caso è la portata che non va a contrastare il tempo perché essa è poca per cui avremmo la formazione delle isole). Se avremmo tanta portata in tanto tempo ci troveremmo davanti una situazione di equilibrio delle isole perché la portata tenta di eroderle, il tempo può favorire la loro formazione per cui arriveremmo ad un equilibrio che si creerà in questo periodo.

Anche in queste prove si può notare che la teoria risponde molto bene sia a livello di tratto intero che di sottotratti. Anche su questi infatti IDRO è negativa e TIME è positivo.

Se volessimo controllare più in profondità i parametri dovremmo guardare i valori che compongono le varie caselle; Per esempio confrontando i coefficienti delle relazioni a livello di sottotratto, sembra in questo caso che la portata sia molto più influente a Nove rispetto che a Frila e Fontaniva (presenta un coefficiente più grande anche se di poco). Questo significa che a parità di portata le isole a Nove avranno tendenzialmente una superficie minore di quelle a Friola e Fontaniva .

7.5 - Indicazione quantitativa effetto portata – tempo

Cercando di dimostrare che la portata ed il tempo sono correlate in modo significativo ai cambiamenti morfologici, dobbiamo prima fare una precisazione di contesto perché se viene preso in considerazione un tratto in cui i cambiamenti dovuti a fattori antropici sono molto frequenti e di pesante impatto, la correlazioni fra le variabili potrebbe venire meno. Per questo viene suggerito di prendere in considerazione un tratto abbastanza stabilizzato nel tempo anche dal punto di vista antropico.

Detto questo è stato analizzato che la somma delle portate sopra al *bankfull* sembra essere l'indice che più si correla rispetto alle altre variabili idrologiche. La portata infatti risulta correlata in modo direttamente proporzionale alla variabile morfologica (al suo aumentare oltre un certo livello si ha un generale allargamento) mentre il tempo risulta essere correlato in maniera inversamente proporzionale (al suo aumentare oltre un certo livello si ha un generale restringimento).

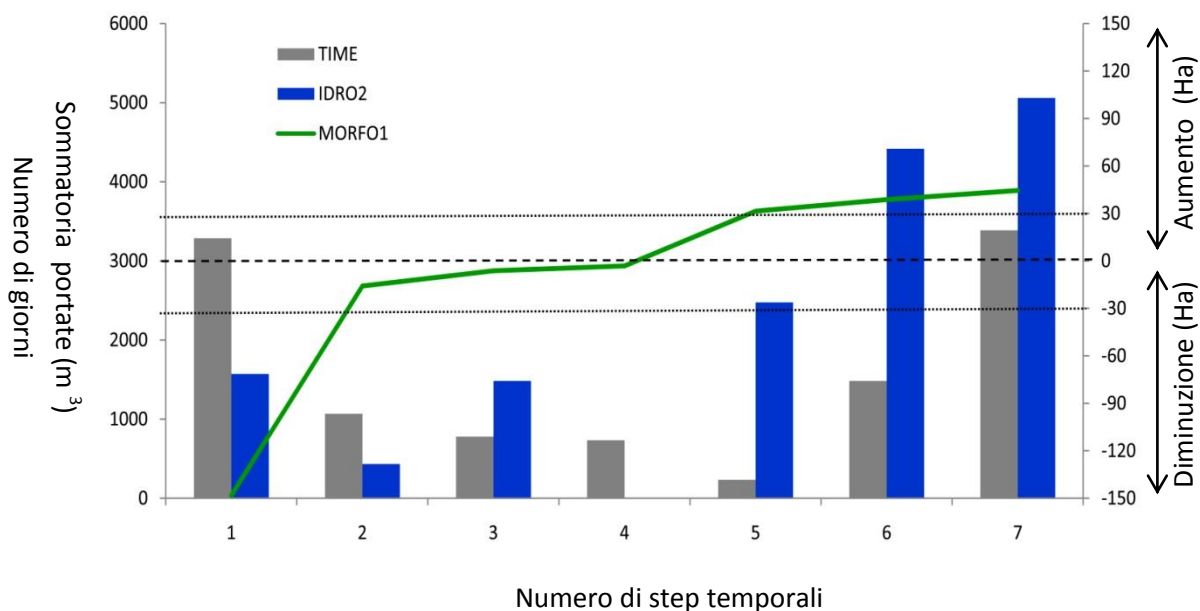
Uno dei nostri principali obiettivi era quello di riuscire a dare delle prime indicazioni quantitative da utilizzare anche in ambito scientifico ma più che altro per scopi gestionali, sulle base dei risultati ottenuti. Abbiamo cercato di regolamentare i nostri riscontri al fine di cercare metterli in pratica.

La tabella 11 sotto riportata rappresenta il *dataset* semplificato utilizzato per individuare la relazione tra variazione morfologica nell'alveo attivo a livello di tratto intero.

Tabella 11 : *Dataset* semplificato riguardante le variabili considerate

	anni	TIME	IDRO 2	MORFO 1
AB	9.0	3287	1569.3	-148.2
EF	2.9	1065	430.9	-15.8
GH	2.1	779	1483.7	-6.2
FG	2.0	731	0.0	-3.1
HI	0.6	234	2474.1	31.3
DE	4.1	1484	4417.2	38.7
BD	9.3	3386	5058.0	44.4

La sua rappresentazione grafica (Figura 41) risulta particolarmente interessante.



Possiamo notare che prendendo in considerazione la variabile idrologica con il tempo ed interpolandola con i valori della variazione dell'alveo quindi la variabile morfologica, supposti pari a circa 30 Ha un "limite" (evidenziato nel grafico e considerato tale dall'effetto

delle piene del 2010 Moretto et al., 2012) per considerare una variazione “significativa” si nota che le variazioni quindi “non significative” sono caratterizzate da relativamente brevi periodi pari a circa 2 – 3 anni con una somma di $Q > 1.5$ TR compresa fra 500 – 1500 m³. I restringimenti significativi invece sembrano essere caratterizzati da periodi superiori ai 3 anni, indicativamente attorno ai 10 anni (nel caso del grafico 9 anni) con somma di $Q > 1.5$ TR attorno ai 1500 m³ pertanto una media annua molto minore rispetto al primo periodo che possiamo definire di “equilibrio dinamico”. Infine gli allargamenti significativi possono essere caratterizzati da tempi molto brevi (1 anno) se presentano una somma di $Q > 1.5$ TR pari oltre i 2500 m³, o da tempi più lunghi ad esempio 10 anni se presentano una somma di $Q > 1.5$ TR dai 5000 m³ o superiore.

In questa tabella abbiamo riassunto il grafico definendo i valori anche simbolicamente per semplificare la spiegazione.

Tabella 12: Parametri di variazione dell'alveo attivo.

TEMPO (ANNI)		SOM. $Q > 1.5$ TR		VARIAZIONE ATTESA
*	~ 1	****	~ > 2500 m ³	Allargamento
**	~ 2 - 3	**	~ 500 - 1500 m ³	Eq. Dinamico
****	~ 10	**	~ < 1500 m ³	Restringimento
****	~ 10	*****	~ > 5000 m ³	Allargamento

7.6 - Scenari ideali tempo – portata: indicazioni per gestione

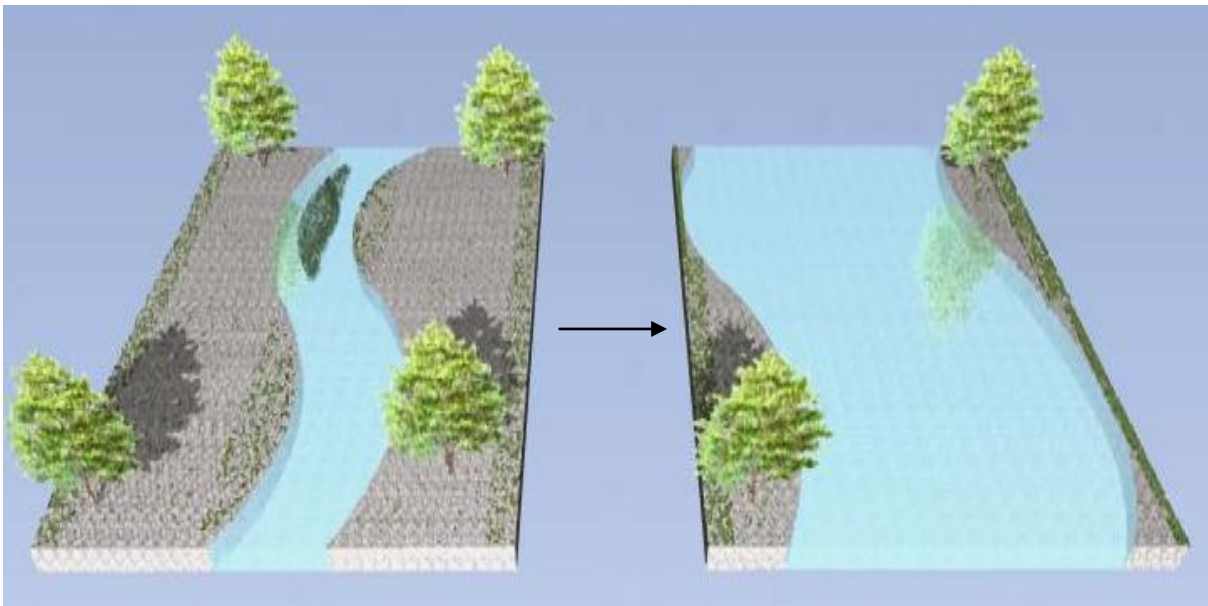
Riprendendo i risultati della tabella 12 abbiamo ricostruito degli scenari che potrebbero aiutare nella valutazione della possibile evoluzione fluviale e per dare delle indicazioni sulla gestione degli ambienti fluviali.

Partendo dai dati ottenuti nell'analisi statistica per il tratto di fiume studiato si è cercato di estrapolare dei limiti di intervallo temporali e di portata che definiscono tre principali scenari possibili di evoluzione morfologica del fiume Brenta, e che potrebbe essere testata anche in altri corsi d'acqua in condizioni simili. Gli scenari proposti non considerano eventuali modificazioni imposte da fattori diversi da quelli idrologici - temporali quali ad esempio l'azione umana. Tuttavia bisogna considerare che la situazione morfologica di partenza è comunque il risultato di decenni di antropizzazione sia a scala di bacino che di tratto.

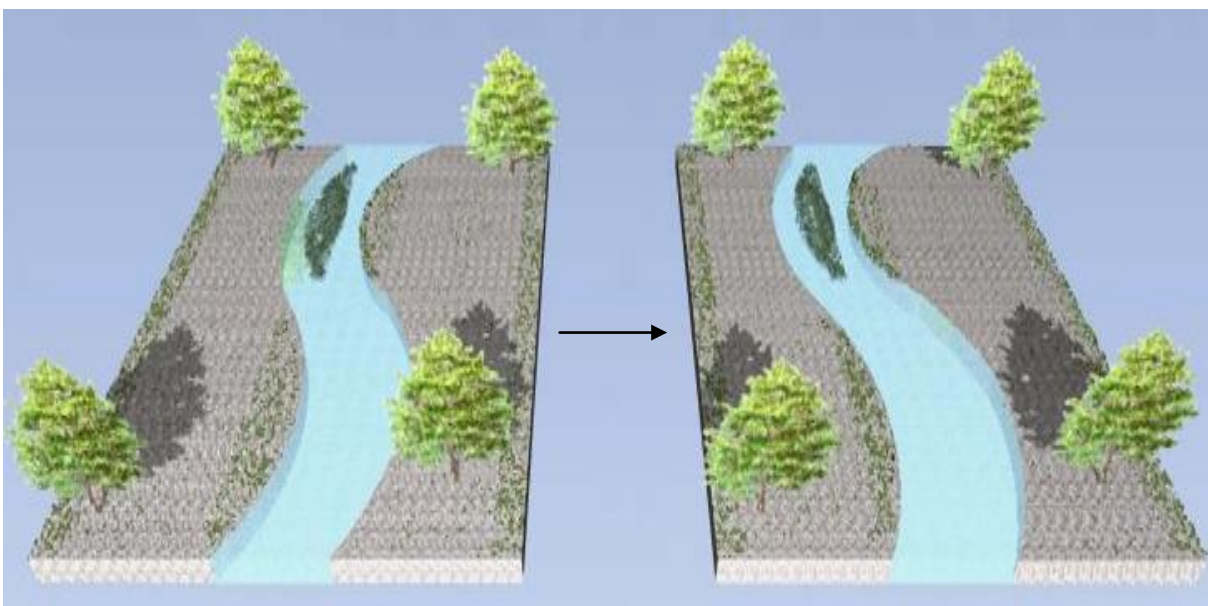
Descriveremo di seguito alcuni scenari, seguendo l'ordine della tabella 12, in cui abbiamo:

1	*	POCO TEMPO	***	TANTA PORTATA	Allargamento
2	**	MEDIO TEMPO	**	MEDIE PORTATE	Eq. Dinamico
3	***	TANTO TEMPO	*	BASSE PORTATE	Restringimento

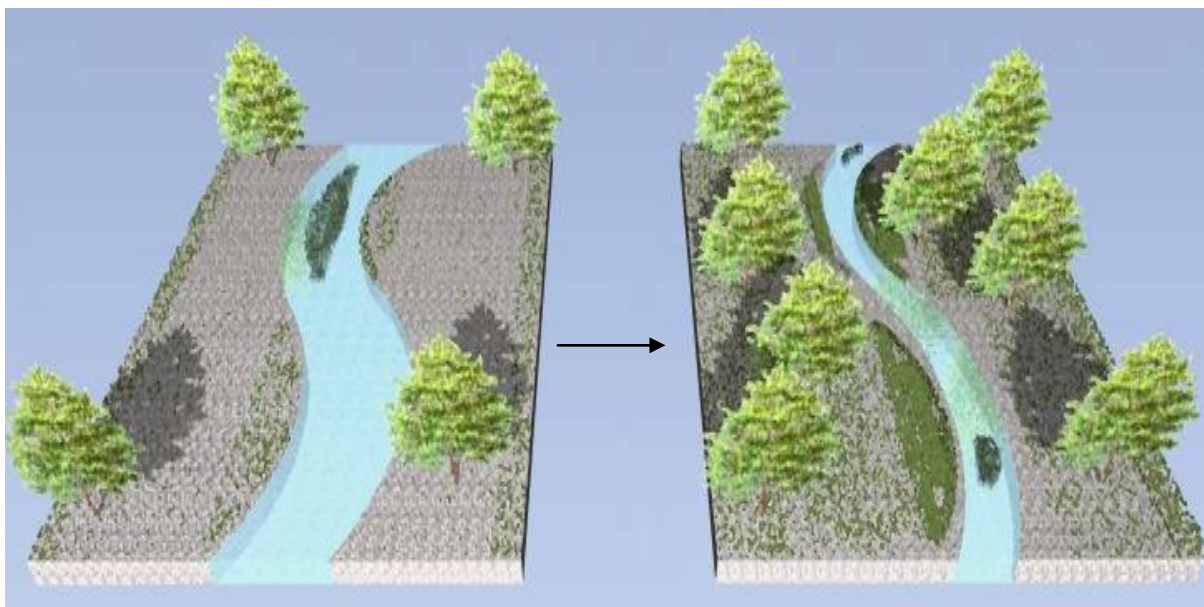
SCENARIO	QUANTITA' TEMPO		QUANTITA' PORTATA		PREVISIONI
1	*	~ 1 ANNO	***	~> 2500 m ³	ALLARGAMENTO



SCENARIO	QUANTITA' TEMPO		QUANTITA' PORTATA		PREVISIONI
2	**	~ 2 - 3 ANNI	**	~< 1500 m ³	EQUILIBRIO DINAMICO



SCENARIO	QUANTITA' TEMPO	QUANTITA' PORTATA	PREVISIONI
3	* * *	~ 10 ANNI	* ~ 500 - 1500 m ³ RESTRINGIMENTO



Nel **primo scenario** come si può vedere abbiamo una situazione di allargamento dell'alveo attivo dovuto ad una forte portata anche se in poco tempo, vediamo che le isole sono state erose come gran parte della piana alluvionale per cui non ci sono più, nel **secondo scenario** abbiamo una situazione di equilibrio dinamico quindi tutto sommato la situazione per qualche anno rimarrà circa la medesima, al massimo con il passare degli anni e con la solita portata potremmo avere un restringimento dell'alveo attivo, anche le isole rimangono invariate.

Nel **terzo scenario** in cui la somma delle portate diminuisce notevolmente l'alveo attivo si è ristretto e le isole sono a volte inglobate dalla vegetazione ripariale.

Gli scenari sopra riportati ci possono dare indicazioni sulla possibile evoluzione del fiume, tuttavia nel presente lavoro non vengono considerati gli effetti antropici che possono esercitare la loro azione sia a scala di bacino con strutture di ritenzione della portata solida e liquida e conseguente incisione dell'alveo (figura 42) o a scala locale con infrastrutture (strade, ponti) che sono in contrasto con la naturale dinamica fluviale (Figure 43 e 44)



Figura 42 Erosione delle fondamenta di una struttura.



Figura 43 : Erosione spondale con relativo danno della strada.



Figura 44 : Diga detritica naturale fra le colonne di un ponte.

CAPITOLO 8

CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi ha avuto come oggetto la valutazione della correlazione fra la morfologia e l'idrologia del fiume Brenta con lo scopo di individuare qualche regola quantitativa di sviluppo per conoscere la miglior strada gestionale in funzione della storia idrologica del fiume. L'area di studio è localizzata in un tratto di pianura del Brenta compreso tra l'abitato di Bassano del Grappa (Vi) e Piazzola sul Brenta (Pd).

Il tratto lungo circa 20 km con una superficie di 1567 Km²; E' caratterizzato da una morfologia "braided" e "wandering" ed ha un'ampiezza compresa tra 70 m e 800 m e una pendenza media dello 0,0035 %.

Questa zona è situata in una posizione intermedia fra la pianura e la fascia pedemontana con precipitazioni medie annue di 1100 mm, concentrate in prevalenza in primavera ed autunno.

Di questo tratto sono state acquisite ed analizzate 8 serie fotografiche tra il 1981 ed il 2011, così da ottenere l'estensione dell'alveo attivo e della vegetazione riparia (variabili morfologiche). L'idrogramma (variabili idrologiche) è stato calcolato a partire dai dati di portata registrati presso la stazione di Cà Barzizza presso Bassano del Grappa. Le variabili idrologico-temporali e morfologiche sono state analizzate in ambiente "R", software statistico in grado di evolversi in continuo grazie ai numerosi "pacchetti" statistici messi a disposizione dai vari svippatori. In questo caso è stata applicata una regressione statistica maggiormente innovativa: "Akaike information criterion" (AICc).

Questi studi ci hanno permesso di capire come nel corso degli anni si siano modificate le caratteristiche del fiume e sulla base di questo ci siamo posti l'obiettivo di trovare un nesso tra le due cose; capire e verificare dal punto di vista statistico se delle variabili morfologiche sono correlate a variabili idrologiche con lo scopo di dare delle indicazioni in termini gestionali e di pianificazione efficace del luogo.

Da tutti i dati in nostro possesso abbiamo estrapolato 9 parametri idrologici e 16 morfologici più una variabile temporale da prendere in considerazione per ogni prova tranne per gli indici che contengono già il tempo al loro interno.

Successivamente si sono creati due *dataset*: il primo in cui si considerano le variazioni morfologiche, temporali ed idrologiche fra i vari periodi rispettando la regola statistica dell'indipendenza dei campioni denominato *dataset* semplificato (contenente soltanto le

combinazioni temporali senza sovrapposizioni fra i vari campioni) , ed il secondo denominato *dataset* completo in cui si considerano tutte le combinazioni temporali possibili.

Già da una prima valutazione comparata dell'andamento dei picchi di portata annuale con le variazioni dell'alveo attivo a scala di tratto sussiste una relazione direttamente proporzionale, supportata dalla regressione statistica AICc; la quale fornisce un esito positivo nella ricerca delle possibili correlazioni tra le due serie di variabili.

I dati del *dataset* semplificato hanno evidenziato che tutte le combinazioni di variabili idromorfologiche sono correlate. Le combinazioni migliori riguardano i dati basati sui sottotratti in particolare quello riguardante la differenza delle isole a Nove Friola e Fontaniva. Dal punto di vista idrologico a parità di variabile morfologica notiamo che la differenza di valori non è molto accentuato.

I dati del *dataset* completo invece hanno evidenziato un numero di combinazioni minori rispetto a quello semplificato in percentuale pari al 79 % con valori di AICc e di coefficienti maggiori. Tutto sommato le relative combinazioni rispondono allo stesso modo del *dataset* semplificato.

Comparando i due *dataset* e seguendo le regole statistiche abbiamo preferito prendere in considerazione per le nostre prove di dettaglio solo i dati del *dataset* senza le sovrapposizioni temporali che risponde in maniera più significativa.

Dall'analisi di questo *dataset* è emerso che sia a scala di tratto intero che di sottotratto all'aumentare della magnitudo cumulata degli eventi di piena aumenta la larghezza dell'alveo attivo e diminuisce quella della vegetazione ripariale.

Con questi dati abbiamo cercato di definire degli scenari di possibile evoluzione morfologica del fiume Brenta e che potrebbero anche essere testati su altri fiumi con condizioni simili.

BILBIOGRAFIA

- Akaike, H. (1980), "Likelihood and the Bayes procedure", in Bernardo, J. M.; et al., Bayesian Statistics, Valencia: University Press, pp. 143-166
- Anderson, D. R. (2008), Model Based Inference in the Life Sciences, Springer
- Andrews, E. D. (1980). Effective And *Bankfull* Discharge Of Streams In The Yampa Basin, Western Wyoming, Journal Of Hydrology, 46, 311-330.
- Ashmore, P.E., (1991). How Do Gravel-Bed Rivers Braid? Canadian Journal Of Earth Sciences 28, 326–341.
- Bertoldi W., Gurnell A., Surian N., Tockner K., Zanoni L., Ziliani L., Zolezzi G. (2009). Understanding Reference Processes: Linkages Between River Flows, Sediment Dynamics And Vegetated Landforms Along The Tagliamento River, Italy. River Research And Applications, 25, 501-516.
- Bertoldi, W., Zanoni, L., And Tubino, M. 2010. Assessment Of Morphological Changes Induced By Flow And Flood Pulses In A Gravel Bed Braided River: The Tagliamento River (Italy), Geomorphology, 114(3), 348–360.
- Biedenharn D.S., Thorne C.R., Soar P.J., Hey R.D. & Watson C.C. (2001). Effective Discharge Calculation Guide. Int.J.Sediment Res., 16(4), 445 – 459.
- Borga M . (2007) . Dispense di Idraulica e Idrologia. Università degli studi di Padova.
- Brice J.C. & Blodgett J.C. (1978). Counter Measures For Hydraulic Problems At Bridges. Analysis And Assessment, 1, Report No.Fhwa-Rd-78-162, Fed. Highway Admin., Washington, Dc, 169 Pp.
- Brice J.C. (1975). Airphoto Interpretation Of The Form And Behaviour Of Alluvial Rivers. Report To The U.S. Army Research Office.
- Brierley G.J. & Fryirs K.A. (2005). Geomorphology And River Management. Applications Of The River Styles Framework. Blackwell Publishing, 398 Pp.
- Brockwell, P. J.; Davis, R. A. (2009), Time Series: Theory and Methods (2nd ed.), Springer
- Burnham, K. P.; Anderson, D. R. (2002), Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach (2nd ed.), Springer-Verlag, ISBN 0-387-95364-7

- Burnham, K. P.; Anderson, D. R. (2004), "Multimodel inference: understanding AIC and BIC in Model Selection", *Sociological Methods and Research* 33: 261-304
- Cavanaugh J. (1997), "Unifying the derivations of the Akaike and corrected Akaike information criteria", *Statistics and Probability Letters* 31: 201-208
- Chappell, A., Heritage, G.L., Fuller, I.C., Large, A.R.G., Milan, D.J., 2003. Geostatistical Analysis Of Ground-Survey Elevation Data To Elucidate Spatial And Temporal River Channel Change. *Earth Surface Processes And Landforms* 28, 349–370.
- Church M.A. (1992). Channel Morphology And Typology. In: P.Callow And Petts, G.E. (Eds), *The Rivers Handbook*, Oxford, Blackwell, 126 – 143.
- Church M.A. (1992). Channel Morphology And Typology. In: P.Callow And Petts, G.E. (Eds), *The Rivers Handbook*, Oxford, Blackwell, 126 – 143.
- Claeskens, G.; Hjort, N. L. (2008), *Model Selection and Model Averaging*, Cambridge
- Comiti, F, Da Canal M, Surian N, Mao L, Picco L, Lenzi 816 Ma. (2011). Channel Adjustments And Vegetation Cover Dynamics In A Large Gravel Bed River Over The Last 200 Years. *Geomorphology* 125: 147-159.
- D'agostino V. (2007). *Dispense di Ingegneria Naturalistica*. Università degli studi di Padova.
- Doering, M., Blaurock, M. And Robinson, C.T. (2012). Landscape Transformation Of An Alpine Floodplain Influenced By Humans: Historical Analyses From Aerial Images. *Hydrol. Process.*, 26: 3319–3326. Doi: 10.1002/Hyp.8374
- Fang, Yixin (2011). "Asymptotic equivalence between cross-validations and Akaike Information Criteria in mixed-effects models", *Journal of Data Science*, 9:15-21.
- Grant G.E., Swanson F.J. & Wolman M.G. (1990). Pattern And Origin Of Stepped-Bed Morphology In High Gradient Streams, Western Cascades, Oregon. *Bulletin Of The Geological Society Of America*, 102, 340-354.
- Gurnell A, Surian N, Zanoni L. (2009). Multi-Thread River Channels: A Perspective On Changing European Alpine River Systems. *Aquatic Sciences* 71: 253-265.
- Hooke, J. M. (2008). Temporal Variations In Fluvial Processes On An Active Meandering River Over A 20-Year Period, *Geomorphology*, 100, 3–13.
- Hurvich, C. M.; Tsai, C.-L. (1989), "Regression and time series model selection in small samples", *Biometrika* 76: 297–307

- Inglis C.C. (1949). *The Behaviour And Controls Of Rivers And Canals*. Central Waterpower Irrigation And Navigation Research Station, Poona, India Research Publication 13, 283 Pp.
- Ispra (2009). *Implementazione Della Direttiva 2000/60/Ce - Analisi E Valutazione Degli Aspetti Idromorfologici*
- Kaless G, Mao L, Lenzi MA . (2011). Regime theories in gravel bed rivers; preliminary comparison between disturbed rivers due to anthropic activities (Northeastern Italy) and natural rivers (Patagonia, Argentina). *Proceedings of the Intermediate Congress of the Italian Association of Agricultural Engineering*; Belgirate, Italy; September 22-24, 2011; pp. 8.
- Kellerhals R. (1982). *Effects Of River Regulation On Channel Stability*. In: R.D.Hey, J.C.Bathurst & C.R.Thorne (Eds), *Gravel-Bed Rivers*, Wiley, Chichester, 685-715.
- Kellerhals R., Church M. & Bray D.I. (1976). *Classification And Analysis Of River Processes*. *J. Hydraul. Div., Asce*, 102, No.Hy7.
- Kiss, T., Sipos, G., 2007. *Braid-Scale Channel Geometry Changes In A Sand-Bedded River: Significance Of Low Stages*. *Geomorphology* 84, 209–221.
- Kondolf G.M. (1994). *Geomorphic And Environmental Effects Of Instream Gravel Mining*. *Landscape And Urban Planning*, 28, 225-243.
- Krapesch G, Hauer C, Habersack H. (2011). *Scale Orientated Analysis Of River Width Changes Due To Extreme Flood Hazards*. *Natural Hazards And Earth System Sciences* 11: 1-11.
- Lawler D.M. (1992). *Process Dominance In Bank Erosion Systems*. In: P.A.Carling & G.E.Petts (Eds), *Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives*, Wiley, 117-143.
- Lenzi M. A. (2007). *Dispense di Tutela del paesaggio agricolo e forestale*. Università degli studi di Padova.
- Lenzi M.A., D'agostino V. & Sonda D. (2000). *Ricostruzione Morfologica E Recupero Ambientale Dei Torrenti.Criteri Metodologici Ed Esecutivi*. Editoriale Bios, 208 Pp.
- Lenzi M.A., Mao L., & Comiti F. (2006). *Effective Discharge For Sediment Transport In A Mountain River: Computational Approaches And Geomorphic Effectiveness*. *Journal Of Hydrology*, 326, 257-276.

Leopold L.B. & Wolman M.G. (1957). River Channel Patterns: Braided, Meandering And Straight. *Us.Geol.Surv., Prof.Paper*, 282-B, 39-85

Leopold L.B., Wolman M.G. & Miller J.P. (1964). *Fluvial Processes In Geomorphology*. Freeman, S. Francisco.

Liébault F, Piégay H. (2002). Causes Of 20th Century Channel Narrowing In Mountain And Piedmont Rivers Of Southeastern France. *Earth Surface Processes And Landforms* 27: 425–444.

Lisle, T.E., Nelson, J.M., Pitlick, J., Madej, M.A., Barkett, B.L. (2000). Variability Of Bed Mobility In Natural, Gravel-Bed Channels And Adjustments To Sediment Load At Local And Reach Scales. *Water Resour. Res.*, Vol. 36, No. 12, 3743-3755.

Lukacs, P.M., et al. (2007). "Concerns regarding a call for pluralism of information theory and hypothesis testing", *Journal of Applied Ecology*, 44:456–460.

Luppi L., Rinaldi M., Teruggi L.B., Darby S.E., Nardi L. (2009). Monitoring And Numerical Modelling Of Riverbank Erosion Processes: A Case Study Along The Cecina River (Central Italy). *Earth Surface Processes And Landforms*. Doi: 10.1002/Esp.1754, Vol.34 (4), 530-546.

McQuarrie, A. D. R.; Tsai, C.-L. (1998), *Regression and Time Series Model Selection*, World Scientific, ISBN 981-02-3242-x.

Montgomery D.R. & Buffington J.M. (1997). Channel-Reach Morphology In Mountain Drainage Basins. *Geological Society Of America Bulletin*, 109 (5), 596-611.

Moretto J., E. Rigon E., L. Mao L., L. Picco, F. Delai, M. A. Lenzi. (2012). Channel Adjustments And Island Dynamics In The Brenta River (Italy) Over The Last 30 Years. In *Revision At River Research And Application Jurnal*.

Picco L, Mao L, Rigon E, Moretto J, Ravazzolo D, Delai F, Lenzi Ma. (2000). Riparian Forest Structure, Vegetation Cover And Flood Events In The Piave River. In “Monitoring, Simulation, Prevention And Remediation Of Dense And Debris Flows Iv” *Wit Transactions On Engineering Sciences*, (Online, Issn: 1743-3553), 73, 137-147.

Picco. L. (2009). *Tesi Di Dottorato “Long Period Morphological Dynamics In Regulated Braided Gravel-Bed Rivers: Comparison Between Piave River (Italy) And Waitaki River (New Zealand)”*.Universita Di Padova. 190 Pp.

- Rinaldi M. & Dapporto S. (2005). Monitoraggio E Analisi Dei Processi Di Arretramento E Dei Meccanismi Di Instabilità Di Sponde Fluviali. In: M. Brunelli & P. Farabollini (Eds), *Dinamica Fluviale, Atti Giornate Di Studio Sulla Dinamica Fluviale*, Grottammare, Giugno 2002, Ordine Dei Geologi Marche, 165-201.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M. (2011), *Manuale Tecnico – Operativo Per La Valutazione Ed Il Monitoraggio Dello Stato Morfologico Dei Corsi D’acqua – Versione 1*, Istituto Superiore Per La Protezione E La Ricerca Ambientale, Roma, 232 Pp.
- Rosgen, D.L. (1994). *A Classification Of Natural Rivers*. Catena, Vol. 22, 169-199. Elsevier Science, B.V., Amsterdam.
- Schumm S.A. & Licity R.W. (1965). Time, Space And Casuality In Geomorphology. *American Journal Of Science*, 263, 110-119.
- Schumm S.A. (1977). *The Fluvial System*. Wiley, New York, 338 Pp.
- Schumm S.A. (1985). Patterns Of Alluvial Rivers. *Annual Reviews Of Earth And Planetary Science*, 13, 5-27.
- Sear D.A., Newson M.D. & Thorne C.R. (2003). *Guidebook Of Applied Fluvial Geomorphology*. Defra/Environment Agency Flood And Coastal Defence R&D Programme, R&D Technical Report Fd1914, 233 Pp.
- Shields F.D. Jr., Copeland R.R., Klingeman P.C., Doyle M.W. & Simon A. (2003). Design For Stream Restoration. *Journal Of Hydraulic Engineering*, 575-584.
- Simon A. & Castro J. (2003). Measurement And Analysis Of Alluvial Channel Form. In: Kondolf G.M. & Piégay H. (Eds), *Tools In Fluvial Geomorphology*, 291 - 322.
- Simon A. & Darby S.E. (1997). Process-Form Interactions In Unstable Sand-Bed River Channels: A Numerical Modelling Approach. *Geomorphology*, 21, 85-106.
- Simon A. & Darby S.E. (1999). The Nature And Significance Of Incised River Channels. In: Darby S.E. & Simon A. (Eds), *Incised River Channels. Processes, Forms, Engineering And Management*, John Wiley & Sons, 3-18.
- Simon A., Dickerson W. & Heins A. (2004). Suspended-Sediment Transport Rates At The 1.5-Year Recurrence Interval For Ecoregions Of The United States: Transport Conditions At The *Bankfull* And Effective Discharge? *Geomorphology*, 58, 243-262.

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: 1641-1656.

Surian N. & Cisotto A. (2007). Channel Adjustments, Bedload Transport And Sediment Sources In A Gravel-Bed River, Brenta River, Italy - *Earth Surf. Process. And Landforms*, 32, Pp. 1641-1656.

Surian N., Rinaldi M., Pellegrini L., Audisio C., Maraga F., Teruggi L., Turitto O. & Ziliani L. (2009a). Channel Adjustments In Northern And Central Italy Over The Last 200 Years. In: James L.A., Rathburn S.L., Whittecar G.R. (Eds.), *Management And Restoration Of Fluvial Systems With Broad Historical Changes And Human Impacts*, Geological Society Of America Special Paper 451, In Stampa.

Surian N., Mao L., Giacomini M. & Ziliani L., (2009b). Morphological Effects Of Different Channel-Forming Discharges In A Gravel-Bed River. *Earth Surface Processes And Landforms*, Doi:10.1002/Esp.1798, In Stampa.

Surian N., Ziliani L., Comiti F., Lenzi M.A., Mao L. (2009c). Channel Adjustments And Alteration Of Sediment Fluxes In Gravel-Bed Rivers Of North-Eastern Italy: Potentials And Limitations For Channel Recovery. *River Research And Applications*, 25, 551-567, Doi: 10.1002/Rra.1231.

Surian N., Rinaldi M., Pellegrini L., Con Il Contributo Di Audisio C., Barbero G., Cibien L., Cisotto A., Duci G., Maraga F., Nardi L., Simoncini C., Teruggi L.B., Turitto O., Ziliani L. (2009d). *Linee Guida Per L'analisi Geomorfologica Degli Alvei Fluviali E Delle Loro Tendenze Evolutive*. Cleup, Padova, 78 Pp.

Surian N, Ziliani L, Comiti F, Lenzi, Ma, Mao L. (2009e). Channel Adjustments And Alteration Of Sediment Fluxes In Gravel-Bed Rivers Of North-Eastern Italy: Potentials And Limitations For Channel Recovery. *River Research And Applications* 25: 551-567.

Takeuchi, K. (1976). "Distribution of informational statistics and a criterion of model fitting", *Suri-Kagaku (Mathematical Sciences)*, 153: 12–18. (In Japanese).

Tempesta, T. (2005). *Appunti di Estimo rurale e Ambientale*. Edizione Cleup. Università degli studi di Padova. 310 Pp ISBN - 13: 9788871787

Thorne, C.R. (1982). Processes And Mechanisms Of River Bank Erosion. In: Hey, R.D., Bathurst, J.C., Thorne, C.R. (Eds), Gravel-Bed Rivers, Wiley, Chichester, 227-271.

Winterbottom S.J. (2000). Medium And Short-Term Channel Planform Changes On The Rivers Tay And Tummel, Scotland – Geomorphology, 34, 195-208.

Wolman M.G. & Miller J.P. (1960). Magnitude And Frequency Of Forces In Geomorphic Processes. Journal Of Geology, 68, No.1, 54-74

Siti Consultati

www.studiocartografico.com/aerofotogrammetria.htm

<http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/manuali-e-linee-guida/idraim-2013-sistema-di-valutazione-idromorfologica>

<http://www.unisky.it/QuaderniDellaBrenta/Default>

www.ambiente.it

Ringraziamenti

Ringrazio tutte le persone che mi hanno sostenuto in questo periodo di studio, specialmente la mia famiglia.

Un Ringraziamento anche a tutti i professori e ai ragazzi che mi hanno fatto da correlatori in questo lavoro di tesi.

GRAZIE.