



Alessandro Paoletti, Giovanni Braga, Andrea Colombo, Stefano Croci, Giovanni Battista Peduzzi, Giovanni Savazzi*

LA GESTIONE DEI SEDIMENTI ALLUVIONALI DELL'ALVEO INCISO DEL FIUME PO

THE RIVER PO SEDIMENT MASTER PLAN

Sommario

Il presente articolo descrive la metodologia di analisi della dinamica dei sedimenti dell'alveo inciso adottata nell'ambito di un importante studio dell'Autorità di Bacino del F. Po relativo al tratto di fiume Po che si sviluppa, per circa 170 km, dalla confluenza del F. Tanaro alla confluenza del T. Arda a valle di Cremona. La metodologia si basa su un approccio sperimentale - modellistico basato su dettagliate analisi di campo e sull'interpretazione geomorfologica e idraulica dei caratteri e delle tendenze evolutive di ogni forma presente nell'alveo inciso.

L'analisi geomorfologica, condotta sulla base delle informazioni disponibili nel periodo 1982 - 2002, con riscontro alle evoluzioni del periodo 2002 - 2004, porta a definire la tendenza evolutiva di accrescimento o erosione e la corrispondente quantificazione volumetrica sia per ogni singola forma presente nell'alveo inciso che per tratti omogenei. L'analisi idraulica integra e completa la metodologia con l'individuazione dei principali meccanismi che le portate fluviali di differente entità esplicano nei confronti dei singoli elementi morfologici e delle opere in alveo.

Dall'insieme delle due analisi, geomorfologica ed idraulica, scaturiscono importanti chiarimenti sulle dinamiche evolutive naturali e alterate dall'azione e dalle opere antropiche. Il bilancio del trasporto solido per singoli tratti omogenei consente poi di definire il "Programma generale di gestione dell'alveo inciso del Po" che indica le politiche di gestione dei sedimenti atte ad evitare il protrarsi di situazioni di grave disequilibrio ieri e oggi lamentate. Il citato Programma generale si estrinseca infatti in tre capitoli principali che rispettivamente descrivono il quadro delle criticità connesse con l'assetto attuale del corso d'acqua, il quadro degli obiettivi di riassetto e il conseguente quadro degli interventi, reciprocamente legati in modo tale che a ciascuna criticità corrisponda un intervento coerente con gli obiettivi e che viceversa ad ogni intervento sia associato l'obiettivo che si vuole conseguire e la criticità a cui deve essere data risoluzione.

Parole chiave: Idraulica fluviale, Morfologia fluviale, Trasporto solido.

Summary

The present paper describes the methodology of analysis of sediment dynamic applied in the study of the "Autorità di Bacino del F. Po" concerning a reach, 170 km long, of the river PO (Italy), from the confluence with Tanaro River up to the confluence with Arda River, downstream the city of Cremona. The methodology hinges on a sperimentally-modellistic approach based on a detailed analysis of geomorphological and hydraulic data and on the examination of the morphological evolution tendencies of the river bed form.

The geomorphological analysis, arranged on the basis of the information available for the period 1982-2002, compared to the evolutions surveyed in the period 2002-2004, allows to define the evolution trend of deposition or erosion and the related volume evaluation both for each form recognized and for homogeneous river reaches. The hydraulic analysis integrates and completes the methodologies by the detection of the main dynamics that the different river discharges activate on each of the morphological elements or artificial works.

From both geomorphological and hydraulic analysis, originates important explanations on the natural evolution tendencies and their modifications due to the human intervention and works.

Moreover, the sediment transport balance for each of the homogenous reaches allows to define the "General Program for managing the Po river bed" that indicates the sediment management policy to prevent situations of serious degradation (present and occurred in the past).

The cited "General Program for managing the Po river bed" has three main chapters describing the set of the present critic situations, the set of reparation objectives and set of the resulting interventions, related in a manner that each critic situation is linked to an intervention consistent with the objectives, and each intervention is associated both to the objective to achieve and to the critical situation to resolve.

Keywords: River Hydraulics, River Bed Morphology, Sediment Transport.

*Alessandro Paoletti, Ordinario di Costruzioni Idrauliche al Politecnico di Milano; Giovanni Braga, già Ordinario di Geologia Applicata all'Università di Pavia; Andrea Colombo, Autorità di Bacino del Fiume Po, Parma; Stefano Croci, Giovanni Battista Peduzzi, Studio Paoletti Ingegneri Associati, Milano; Giovanni Savazzi, geologo libero professionista.

1. INTRODUZIONE

Il fiume Po, come tutti i corsi d'acqua alluvionali a fondo mobile ed alveo solo parzialmente vincolato, scorre sui propri sedimenti realizzando adattamenti morfologici in termini di dimensioni, forme, tracciato, pendenza al variare delle condizioni di regime liquido e solido e dei condizionamenti antropici presenti.

L'asta del Po, esaminata alla scala temporale del XX secolo, ha subito notevoli trasformazioni morfologiche e geometriche in conseguenza principalmente alla forte pressione antropica manifestatasi a partire dagli anni '50 del secolo scorso ed identificabile in particolare con l'estrazione di inerti dagli alvei, la costruzione di opere di canalizzazione, l'urbanizzazione di molte aree di pertinenza fluviale.

Tali attività antropiche, che avevano assunto dimensioni rilevanti nel periodo precedente gli anni '80, oggi sono ricondotte a valori molto meno impattanti. Tuttavia l'effetto di tali modificazioni, fra cui in particolare il forte fenomeno di approfondimento delle quote di fondo medio dell'alveo rilevabile diffusamente tra il 1954 ed il 1979, è ancor oggi causa di numerose problematiche fra cui:

- lo scalzamento delle fondazioni dei ponti e delle opere di difesa idraulica (difese spondali, pennelli, argini in frodo);
- l'impossibilità a derivare di numerose opere di presa in seguito all'abbassamento dei livelli idrici di magra (a parità di portata);
- la necessità di rifacimento delle conche di navigazione in seguito a processi di approfondimento dei fondali;
- la riduzione dell'apporto solido al litorale costiero del mar Adriatico.

Spesso il modellamento dell'alveo, che avviene attraverso processi sia di erosione del letto e delle sponde, sia di trasporto e deposizione di sedimenti con conseguente formazione e traslazione delle forme di fondo (sabbioni, ghiaioni), è interpretato come fonte di potenziale pericolo per il territorio circostante la regione fluviale. Ne conseguono richieste, specialmente a seguito di eventi di piena, di consistenti interventi di ricalibratura della sezione trasversale, a volte erronei, nella maggior parte dei casi effettuati in via d'urgenza senza una precisa e specifica conoscenza delle dinamiche fluviali in atto e senza una valutazione dell'ordine di grandezza del materiale da asportare in relazione alle potenzialità medie annue di trasporto solido del tratto.

La necessità di pianificare una corretta gestione dei sedimenti e manutenzione dell'alveo fluviale è obiettivo prioritario del Piano di Bacino del Po. In questo quadro il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) e in particolare la "Direttiva tecnica per la programmazione degli interventi di gestione dei sedimenti degli alvei dei corsi d'acqua" prevede che venga definito il *Programma generale di gestione dei sedimenti*, sintesi delle attività di studio condotte nell'ambito dell'Accordo per la gestione dei sedimenti del fiume Po da confluenza Tanaro al mare, intervenuto tra l'Autorità di Bacino del fiume Po, l'AIPO - Agenzia Interregionale per il PO (ex Magistrato per il PO) e le Regioni Lombardia, Emilia Romagna e Veneto. Il Programma generale disciplina le attività di monitoraggio morfologico e del trasporto solido, le attività di manutenzione e sistemazione degli alvei comportanti in particolare movimentazione ed eventualmente asportazione di materiale litoide, nonché pianifica gli interventi di manutenzione di carattere strategico e straordinario.

Il presente articolo riferisce in merito alle particolari metodologie adottate negli studi (Autorità di Bacino per il Fiume Po, 2005) condotti per la definizione del citato Programma generale di gestione e in particolare nell'analisi conoscitiva e nell'interpretazione e quantificazione delle dinamiche sedimentologiche relative ad un primo lungo tratto di circa 170 km dell'alveo inciso del fiume Po compreso tra la confluenza Tanaro poco a valle di Alessandria e la confluenza Arda poco a valle di Cremona (v. *Figura 1*). Sono ora in corso analoghi studi per estendere il Programma di gestione dei sedimenti al successivo tratto di Po, da confluenza Arda al mare.

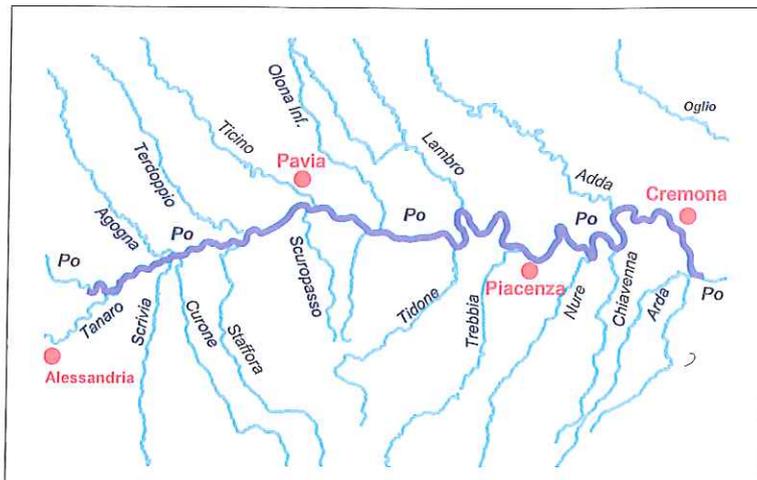


Figura 1 - Planimetria generale del F. Po nel tratto di interesse.

2. LA MODELLISTICA UTILIZZATA

E' subito da specificare come l'ambito fluviale oggetto degli studi sia rappresentato dall'alveo inciso e non dalle aree di espansione (aree golenali poste tra il limite di sponda dell'alveo inciso e gli argini maestri) interessate dalle piene fluviali di maggiore entità (v. *Figura 2*). Queste ultime infatti vengono interessate dalla corrente e dai conseguenti movimenti morfologici solo saltuariamente, dal momento che nel tratto esaminato la capacità idraulica dell'alveo inciso è compatibile con portate dell'ordine di $4'000 \div 7'000 \text{ m}^3/\text{s}$, riferibili a tempi di ritorno dell'ordine di qualche unità di anno. L'evoluzione morfologica di interesse è infatti quella dominata dai fenomeni di erosione, trasporto e deposito che, sia pure con notevole irregolarità, sono continuamente attivi, anche in magra, lungo le sponde e nel letto dell'alveo monocursale o degli alvei pluricursali del fiume.

Il fatto che le caratteristiche del Po nel tratto in esame siano molto variabili, sia per le differenze nella naturale dinamica e morfologia fluviale sia per la presenza di interventi antropici spesso secolari legati alle più diverse finalità, ha indotto grande circospezione nella scelta della metodologia di analisi della situazione in atto e delle tendenze evolutive.

Infatti è subito apparso come allo stato attuale delle conoscenze un'interpretazione dei fenomeni condotta solo mediante una modellistica matematica potrebbe fornire risultati solo nominalmente validi, ma di fatto non si sa quanto avulsi dalla realtà.

Non sembra infatti che essa, pur utilizzando i pacchetti informatici più potenti oggi esistenti in materia di modellazione morfo-idraulica dei fiumi, potrebbe essere in grado di cogliere tutta la complessità dell'ambiente fluviale del Po e delle influenze antropiche cui esso è stato ed è tuttora soggetto. Considerando che l'alveo inciso del Po è sede di fenomeni di

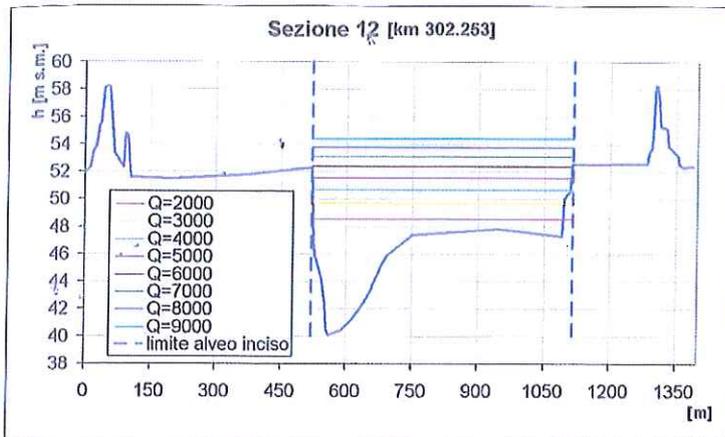


Figura 2 - Esempio tipico di sezione trasversale del fiume Po, con gli argini maestri, le aree golenali e, al centro, l'alveo inciso; in corrispondenza di questo sono indicati i valori dei tiranti idrici riferiti a diversi valori della portata in m^3/s .

namici molto intensi sia nella migrazione dell'alveo, laddove essa ha ancora possibilità di esplicarsi, sia per gli effetti erosivi e deposizionali provocati dalle variabili curvature dei filoni di corrente, una modellazione sufficientemente adeguata dovrebbe presentare le seguenti caratteristiche:

- la componente idrodinamica dovrebbe basarsi su schemi tridimensionali onde riprodurre, usufruendo di un reticolo di calcolo di idoneo dettaglio geometrico e con sufficiente conoscenza delle caratteristiche di scabrezza, il campo di moto che agisce nei tratti a curvatura più pronunciata in funzione della serie continua delle portate in alveo;
- tali campi di moto dovrebbero essere determinati considerando entrambe le fasi liquida e solida e quest'ultima in entrambe le modalità di trasporto di fondo e in sospensione;
- per determinare se le conseguenti azioni di trascaldamento sul perimetro bagnato abbiano o meno la capacità di provocare condizioni di deposito, trasporto o erosione, sarebbe necessario riprodurre efficacemente le azioni sull'interfaccia liquido-solido in funzione delle condizioni di equilibrio dei sedimenti reali, essendo queste legate, ricordando solo alcuni degli aspetti più importanti, alla loro composizione granulometrica, alla loro successione stratigrafica, al loro grado di compattazione, alle condizioni di giacitura su sponda inclinata, al grado di imbibizione idrico in funzione dell'evoluzione dei tiranti idrici, alla loro eventuale coesione, alla presenza e tipologia della vegetazione e della connessa armatura del suolo determinata dall'apparato radicale;
- le ricordate infrastrutture antropiche dovrebbero essere rappresentate nella loro effettiva consistenza geometrica, idraulica e strutturale;
- per riprodurre sia l'evoluzione del passato sia quella futura dovrebbero essere ben rappresentati gli ingressi liquido-solidi dal tratto di monte del Po e dagli affluenti, nella loro dinamica temporale, nonché la localizzazione e l'entità delle attività effettive di estrazione di inerti.

È evidente che un siffatto modello "perfetto" non sia disponibile, anche se per qualche componente (ad esempio la componente idrodinamica su fondo mobile di tipo incoerente) i pacchetti oggi utilizzabili sono certamente assai potenti (M. Guerero, A. Lamberti, 2004).

D'altra parte occorre sottolineare come una buona modellazione sia in ogni caso legata ad una conoscenza almeno altrettanto buona della realtà. Orbene nel caso del Po la situazione conoscitiva, peraltro oggi più favorevole rispetto a quella anche del passato più recente, è ben lontana dal consentire di mettere a punto una modellazione anche solo approssimativa di tutti i complessi fenomeni prima citati, oltretutto considerando l'enorme difficoltà di rappresentare con tale modello un tratto di Po lungo ben 170 km circa.

In proposito, si consideri che:

- la conoscenza geometrica disponibile dell'alveo del Po al momento dello studio è costituita solo dalle sezioni topografiche AIPO del 2004 da foce Tanaro a foce Ticino (n. 47 sezioni) e del 1999 da foce Ticino a foce Arda (n. 71 sezioni); in tutto 118 sezioni per circa 170 km, cioè meno di una al chilometro¹;
- la classificazione granulometrica dei sedimenti è assai poco conosciuta relativamente agli strati sotterranei interessati dai fenomeni erosivi;
- il ruolo dei vari tipi di vegetazione presenti nell'alveo del Po nei riguardi dell'erodibilità dei sedimenti è assai poco conosciuto;
- la dinamica degli apporti solidi dal tratto di monte del Po e dagli affluenti è stata quantificata (Autorità di Bacino del fiume Po, Sottoprogetto SP4, 1995) con stime affette dalle citate incertezze topografiche, geometriche, geologiche, ecc. e solo in valori medi annui;
- la conoscenza delle estrazioni di inerti è nota in modo sintetico e in base ai soli dati di concessione.

In definitiva, è emerso come fosse di gran lunga preferibile attestarsi al momento su una metodologia di analisi del reale, quindi di tipo sperimentale, il più dettagliata possibile e strettamente ancorata alle informazioni disponibili o comunque desumibili dalle osservazioni di campo, dalla quale ottenere la migliore conoscenza "fisica" del fiume attraverso l'interpretazione dell'evoluzione di ogni singola forma geomorfologica presente nell'alveo inciso e la corrispondente rappresentazione del comportamento idraulico. L'approccio metodologico scelto si basa quindi su un'analisi multidisciplinare interfacciante l'analisi geomorfologica e l'analisi idraulica di ogni singolo elemento caratteristico naturale o antropico dell'alveo inciso.

I risultati che ne sono scaturiti sono di notevole interesse oltre che per l'elevato contenuto tecnico scientifico introdotto dalla metodologia messa a punto, per il fatto che hanno consentito di poter disporre di una adeguata conoscenza delle dinamiche morfologiche del fiume e del fenomeno del trasporto solido necessaria per la definizione delle esigenze di manutenzione e per la relativa programmazione degli interventi.

3. LE CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE GENERALI DELL'ASTA FLUVIALE

Nel grafico superiore di Figura 3 è mostrato in modo schematico il profilo altimetrico della pianura alluvionale da confluenza Tanaro a confluenza Arda, calcolato lungo il tracciato linearizzato del Po, mentre nel grafico inferiore è indicato il corrispondente profilo altimetrico del fondo alveo del Po, calcolato lungo lo sviluppo dell'alveo fluviale, assai più lungo di quello del piano campagna del primo grafico a causa dei grandi

¹ Sono ora disponibili rilievi digitali (sezioni, batimetrie e DTM) di ottimo dettaglio che potranno essere utilizzati nei successivi studi di approfondimento.

meandri che il Po presenta nel tratto compreso tra foce Tidone a foce Arda.

Come si evince dal grafico superiore la pianura alluvionale presenta:

1. una pendenza media dell'ordine dello 0,6 ‰ da foce Tanaro fino a circa 10 km da foce Terdoppio;
2. una pendenza media dell'ordine dello 0,4 ‰ nel tratto successivo fino a foce Ticino;
3. una pendenza media dell'ordine dello 0,1 ‰ da foce Ticino a foce Tidone;
4. una pendenza media dell'ordine dello 0,5 ‰ da foce Tidone alla traversa di Isola Serafini;
5. una pendenza media ancora dell'ordine dello 0,5 ‰ dalla traversa di Isola Serafini a foce Arda.

Risulta quindi che la pendenza media della pianura alluvionale, che normalmente diminuisce verso valle, qui invece presenta nel tratto 3 una pendenza molto minore degli altri tratti di monte e di valle. In effetti, all'altezza del meridiano passante circa per foce Tidone, e quindi al termine del tratto 3, il Po intacca il substrato lapideo pre-quadernario, localmente rappresentato dalla "culminazione assiale" esistente in continuità con la struttura geologica sepolta costituente il "Colle di S. Colombano" e lo "Sperone di Stradella". La ridotta pendenza della piana alluvionale nel tratto 3 è quindi provocata dalla presenza della soglia naturale costituita dalla citata formazione. A valle di essa la pendenza della piana si riporta infatti su un valore medio del 5 per decimila.

Tale riduzione di pendenza, unita alle differenti portate medie veicolate dal Po, crescenti ovviamente verso valle per il contributo degli affluenti, tra i quali è notevole quello del Ticino, comporta differenti tendenze morfologiche dell'alveo inciso del Po, che da monte a valle passa da un alveo rettilineo pluricursale (braided), ad un alveo ancora pseudo-rettilineo ma monocursale, per assumere quindi una morfologia chiaramente a meandri.

È molto interessante riscontrare tali caratteristiche morfologiche confrontando le cartografie attuali con le cartografie storiche di Brioschi (Brioschi, 1874) del diciannovesimo secolo, in un'epoca cioè in cui i vincoli antropici, pur presenti, erano ben minori di quelli attuali.

Le differenti morfologie sono anche correlate alle caratteristiche granulometriche dei sedimenti. Le ghiaie e sabbie grossolane, che dal tratto di monte e dagli affluenti pervengono in Po lungo il tratto 1 dopo il Tanaro, riescono a essere movimentate solo nell'ambito del tratto stesso, dotato di adeguata capacità di trasporto, ma non nei tratti successivi in cui la minore capacità di trasporto legata alla minor pendenza fluviale consente il trasporto e l'equilibrio in alveo solo delle sabbie fini.

L'alveo inciso del fiume presenta infatti oggi un profilo altimetrico (Figura 3, in basso) così caratterizzato:

1. nel tratto che va da foce Tanaro a circa 10 km a monte di foce Terdoppio (località Pancarana) la pendenza media è dell'ordine dello 0,6 - 0,7 ‰ e quindi poco maggiore di quella della pianura; in tale tratto infatti il fiume scorre con andamento pressoché rettilineo, con morfologia di tipo intrecciato pluricursale (braided) (Figura 4);
2. nel tratto successivo fino a foce Ticino la pendenza media è dell'ordine dello 0,3 ‰ e quindi poco minore di quella della pianura; in tale tratto infatti il fiume scorre ancora con andamento pseudo-rettilineo pur manifestando un assetto curvilineo poco accentuato; la morfologia è qui decisamente monocursale;
3. nel tratto successivo fino a foce Tidone la pendenza media è dell'ordine dello 0,2 ‰ e quindi poco differente da quella della pianura che, come prima esposto, è fortemente ridotta rispetto a quella dei tratti precedenti a causa della soglia

naturale prima citata; in tale tratto infatti il fiume scorreva anticamente con andamento fortemente meandrizzato, come dimostrano le cartografie storiche precedenti alle carte Brioschi e come è testimoniato dai numerosi relitti degli antichi meandri riscontrabili sul territorio circostante il Po; gli imponenti fenomeni migratori che caratterizzavano i meandri di questo tratto indussero tra il '700 e l'inizio dell'800 alla costruzione di argini e difese spondali fortemente condizionanti la naturale tendenza del fiume e condussero alla formazione di un alveo quasi rettilineo, del quale fornisce testimonianza la carta Brioschi e che si mantiene anche oggi (Figura 5);

4. analogamente, nel tratto successivo fino alla traversa E-NEL di Isola Serafini e poi fino a foce Arda la pendenza media è dell'ordine dello 0,2 - 0,3 ‰ e quindi ancora ben inferiore a quella della pianura; in questo tratto il fiume scorre ancora oggi con andamento fortemente meandriforme, anche se i fenomeni di migrazione di tali meandri non sono oggi più possibili a causa delle arginature e delle difese spondali. A titolo di esempio in Figura 6 è riportato il tratto a meandri immediatamente a valle di Piacenza e a monte della traversa di Isola Serafini nelle due configurazioni del 1874 e dei giorni nostri. La naturale dinamica morfologica è oggi bloccata anche nei riguardi dell'alveo inciso a causa della realizzazione negli ultimi cinquanta anni di innaturali opere di difesa delle sue sponde, costruite con la finalità di difendere dalla continua evoluzione erosiva le corrispondenti aree golenali; il vistoso e assai pericoloso schiacciamento del meandro dell'alveo inciso in corrispondenza di foce Nure (Figura 6) ne dà testimonianza.

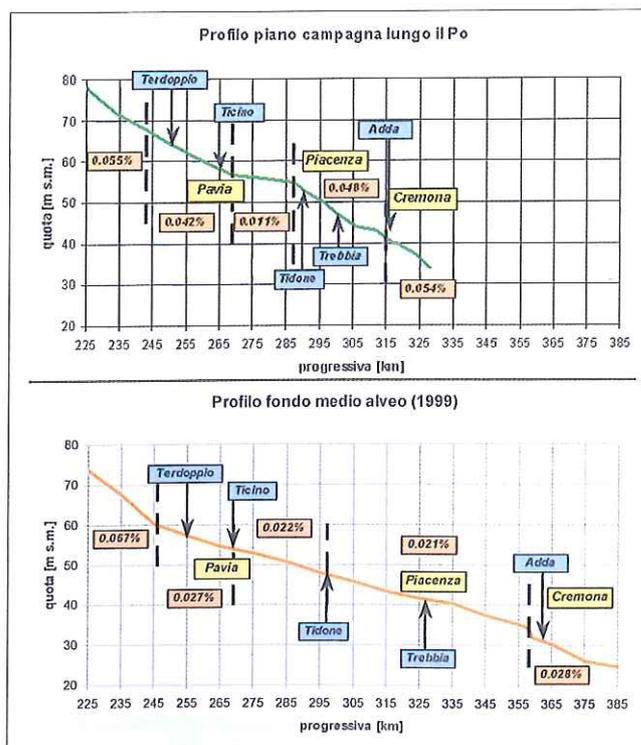


Figura 3 - Profili longitudinali generali della piana alluvionale e del F. Po nel tratto di interesse.

4. IL BILANCIO DEL TRASPORTO SOLIDO

La determinazione del bilancio del trasporto solido del corso d'acqua è condotta seguendo un approccio di tipo sperimentale-modellistico, con l'obiettivo di fornire uno strumento di sin-

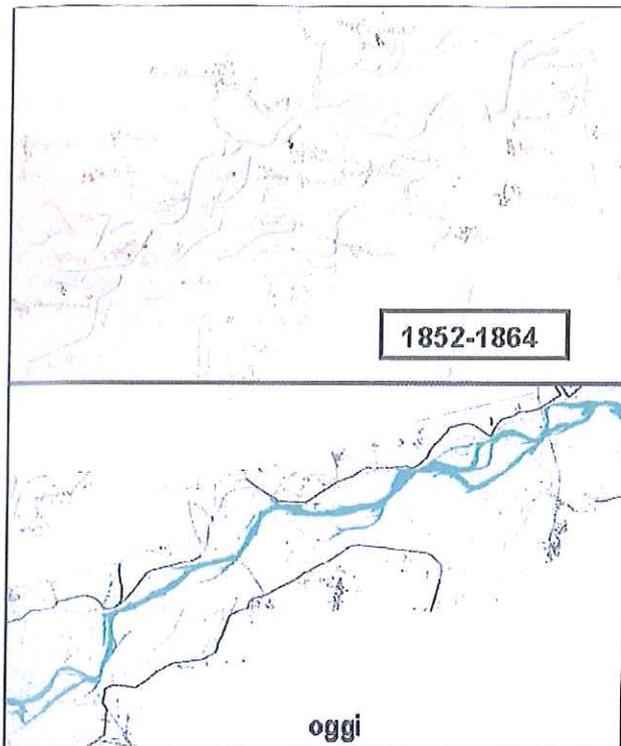


Figura 4 - Il tratto pluricursale a valle di foce Tanaro nella carta Brioschi del periodo 1852-1864 e quello attuale.

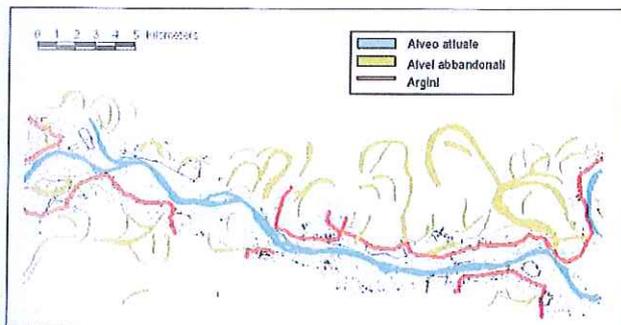


Figura 5 - Antichi meandri inattivi tra foce Ticino e foce Tidone e andamento attuale quasi-rettilineo.

tesi per tratti omogenei derivante dalle analisi di tipo puntuale. In particolare il bilancio deriva dall'aggregazione lungo la progressiva, secondo lo schema riportato nella Figura 7, delle determinazioni derivanti dagli studi geomorfologici, idraulici e tenendo conto degli apporti esterni e dei volumi estratti.

La metodologia utilizzata è partita dal confronto tra la situazione geomorfologica rappresentata nella carta 1982 (CER) e quella aggiornata al 2002 (Autorità di Bacino del Fiume Po). Per tal via, sono state desunte le modificazioni planimetriche delle forme di erosione e di deposito delle barre², delle isole, delle sponde e del fondo presenti nell'alveo inciso del fiume Po, verificatesi nel "ventennio" esaminato.

Seguendo lo schema della Figura 7, in ogni tratto fluviale il bilancio della portata media di trasporto solido (valutata in termini di volume di trasporto nel periodo di riferimento) è fornito dall'espressione:

$$G_i = G_{i-1} + Af - Estr + \Sigma E_{bar} - \Sigma D_{bar} + \Sigma E_{sp} - \Sigma D_{sp} + \Sigma E_{fondo} - \Sigma D_{fondo}$$

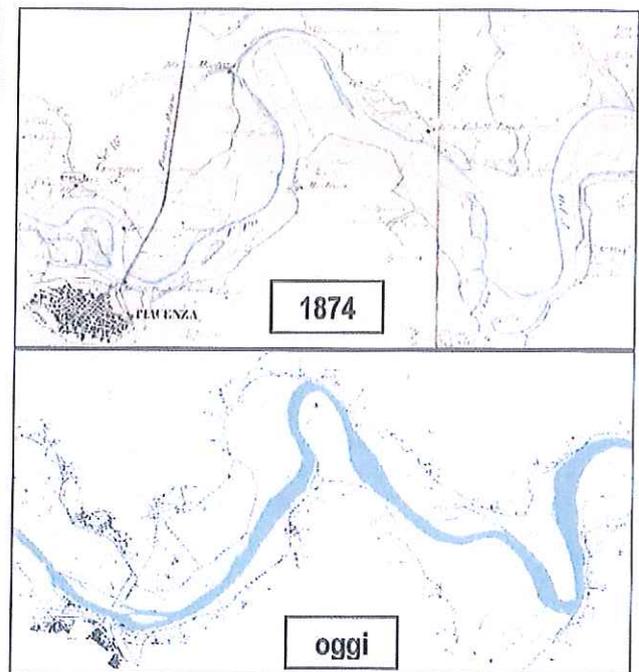


Figura 6 - Cartografia Brioschi aggiornata al 1874 e lo stato attuale del tratto a valle di Piacenza.

in cui:

- G_p, G_{i-1} = portate solide medie nelle sezioni rispettivamente i di valle e $i-1$ di monte del tratto considerato;
- Af = portata solida media proveniente dagli affluenti nel tratto considerato;
- E_{str} = portata solida media estratta dal tratto considerato;
- ΣE_{bar} = sommatoria delle portate medie rese disponibili dalle erosioni di barra e delle isole del tratto considerato;
- ΣD_{bar} = sommatoria delle portate medie arretratesi nei depositi di barra e delle isole del tratto considerato;
- ΣE_{sp} = sommatoria delle portate medie rese disponibili dalle erosioni di sponda del tratto considerato;
- ΣD_{sp} = sommatoria delle portate medie arretratesi nei depositi di sponda del tratto considerato;
- ΣE_{fondo} = sommatoria delle portate medie rese disponibili dalle erosioni di fondo alveo del tratto considerato;
- ΣD_{fondo} = sommatoria delle portate medie arretratesi nei depositi di fondo alveo del tratto considerato.

Come si vede l'espressione precedente riporta, oltre ai termini relativi all'apporto esterno Af dagli affluenti e alle estrazioni E_{str} di inerti, sui quali non sussistono motivi di commento, i contributi positivi (erosioni) o negativi (depositi) legati alle forme morfologiche indagate (barre, isole e sponde) situate all'interno dell'alveo inciso, ma emergenti al di sopra del livello idrico della magra ordinaria, del livello idrico cioè che caratterizza l'alveo fluviale all'epoca dei rilevamenti effettuati alle date delle cartografie di riferimento 1982, 2002 più oltre citate. Per una completa valutazione del bilancio solido occorre quindi aggiungere nell'equazione anche gli analoghi termini positivi o negativi relativi rispettivamente alle erosioni e depositi su bacchei di fondo alveo avvenuti all'interno dell'alveo di magra, per la valutazione dei quali si è adottata la metodologia più oltre descritta.

² Il termine "barra" designa gli accumuli di sedimenti presenti all'interno dell'alveo inciso in adiacenza delle sponde.

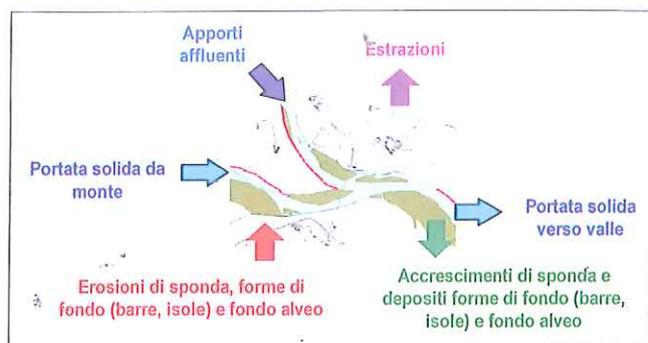


Figura 7 - Schema modello di analisi del bilancio del trasporto solido.

4.1 L'analisi geomorfologica

L'analisi geomorfologica ha preso in considerazione il ventennio 1982 - 2002, particolarmente significativo in quanto all'interno dello stesso si sono verificati due eventi di piena straordinaria (1994 e 2000) preceduti da periodi relativamente estesi (1982 - 1993) in cui l'attività del corso d'acqua nell'alveo inciso è stata legata essenzialmente alle condizioni di regime ordinario o di magra.

L'analisi è stata supportata dalla seguente documentazione:

- "Carta geomorfologica del fiume Po" - CER 1982;
- "Carta geomorfologica del fiume Po" - AdBPo 2002;
- "Carta Tecnica Regione Lombardia (CTR)" - volo 1994 pre-alluvione '94;
- "DTM LaserScann, passo 2 metri" da confluenza Tanaro a Ponte della Becca - 2004;
- "Rilievi topografici" delle sezioni trasversali del F. Po - 1999 e 2004;
- "Rilievi aereofotogrammetrici scala 1:10'000 e 1:50'000" - 1988;
- "Fotografie aeree magra invernale del F. Po" - 2002;
- "Fotografie aeree magra estiva del F. Po" - 2003;
- "Fotografie aeree magra invernale del F. Po" - 2004.

Le informazioni desumibili dagli elaborati in questione, integrate attraverso osservazioni dirette sul campo e confronto con "step" temporali intermedi (desumibili dai voli e da cartografie pregresse), hanno consentito di valutare il grado di stabilità delle diverse forme di deposito. Infatti, in generale, barre caratterizzate da una rimozione e sostituzione periodica della porzione "corticale" di sedimento (corrispondente in generale alla parte emersa, rispetto alla quota di magra) non riescono a essere colonizzate da una vegetazione in grado di evolvere, più o meno rapidamente, da una tipologia "pioniera" verso una vegetazione arborea stabile. Tale condizione è più accentuata nei casi in cui la superficie della barra possa essere sommersa anche per modeste portate di piena, riconducibili all'attività ordinaria del corso d'acqua.

Per definire il grado di stabilità di una forma di fondo sono state considerate le seguenti caratteristiche principali:

- a) persistenza temporale della forma in relazione alla relativa estensione planimetrica;
- b) persistenza temporale di una vegetazione arborea stabile, o evoluzione della vegetazione da cespugliosa verso una vegetazione arborea stabile;
- c) connotazioni geomorfologiche locali del corso d'acqua potenzialmente favorevoli al mantenimento e/o all'accrescimento della forma nel breve e medio periodo (ad es.: sponda convessa di un'ansa meandrica; sponda in curva convessa; presenza di opere idrauliche che favoriscano il deposito; presenza di ostacoli naturali o artificiali che favoriscano il deposito).

La caratterizzazione "dell'impronta" dovuta all'attività ordinaria rispetto a quella straordinaria del corso d'acqua è stata impostata attraverso la valutazione del "peso" che entrambe hanno nel controllo della configurazione morfologica delle forme di erosione e deposito presenti nell'alveo di magra emerso.

Allo scopo la fotorestituzione in scala 1:10'000 della Carta Tecnica della Regione Lombardia del maggio-giugno 1994 ha fornito la rappresentazione delle condizioni morfologiche dell'alveo riscontrabili poco prima dell'alluvione del 1994. Il confronto tra questa condizione e quella relativa al 1982 è risultato quindi assai significativo della "normale" attività ordinaria del corso d'acqua per il periodo di circa dodici anni non interessato da piene eccezionali.

Per contro il confronto tra la condizione morfologica pre-alluvione '94 e la configurazione al 2002 evidenzia, con buona attendibilità, le modificazioni sostanzialmente attribuibili ai due eventi di piena straordinaria del '94 e del 2000. Tali modificazioni sono state documentate anche attraverso il volo AIPO post-alluvione 1994. Inoltre, per confronto con la condizione pre-alluvione '94, è stato possibile individuare i fenomeni di erosione già in atto prima delle grandi piene, la cui evoluzione appare condizionata soprattutto dal regime ordinario.

In sintesi, l'individuazione delle tendenze evolutive è stata effettuata incrociando le risultanze della documentazione pregressa, delle osservazioni dirette sul campo (sopralluoghi in barca) e della fotointerpretazione, mediante la seguente procedura:

- a) individuazione delle tendenze evolutive riportate nella cartografia geomorfologica del 1982: tratti di sponda con tendenza all'arretramento (erosione) e/o all'avanzamento (deposito), barre attive (instabili), inattive e sospese (stabili);
- b) controllo e verifica con la configurazione al 1994, pre-alluvione e il 1994 post-alluvione;
- c) controllo e verifica delle tendenze risultanti con quelle indicate nella successiva cartografia geomorfologica del 2002;
- d) differenziazione tra forme in evoluzione costante dal 1982, forme attivate dalla piena del 1994, forme la cui tendenza evolutiva si è arrestata durante il periodo di osservazione e forme per le quali si è verificata una inversione della tendenza evolutiva;
- e) restituzione della configurazione delle tendenze evolutive 2002, con differenziazione tra forme di erosione sensibili all'attività ordinaria e forme di erosione sensibili all'attività straordinaria; forme di deposito stabili o con tendenza alla stabilizzazione e forme di deposito instabili;
- f) confronto e verifica delle tendenze al 2002 con le osservazioni eseguite attraverso i sopralluoghi in barca;
- g) confronto e verifica delle complessive risultanze con le fotografie aeree della magra 2004 e con il DTM LaserScan (per i tratti in cui questi erano disponibili).

Le forme censite, complessivamente in numero pari a 484 lungo l'intera asta di 170 km analizzata, sono state schedate e riportate nella cartografia 1:10.000, secondo la seguente classificazione:

- deposito di barra già presente nel 1982;
- formazione o accrescimento nel periodo 1982 - 2002, con suddivisione tra parte stabile e parte rimobilizzabile ed indicazione della classe litologica prevalente (ghiaie o sabbie);
- formazione o accrescimento di barra nel periodo 1982 - 2002, per la presenza di pennelli;
- formazione o accrescimento di barra nel periodo 1982 - 2002, in corrispondenza di soglie naturali (testate affioranti o subaffioranti di substrati lapidei);
- deposito o accrescimento di sponda nel periodo 1982 -

- erosione di barra, nel periodo 1982 - 2002, con suddivisione tra la parte asportata in regime ordinario e straordinario ed indicazione della classe litologica prevalente (ghiaie o sabbie);
- erosione di sponda, nel periodo 1982 - 2002, con suddivisione tra la parte asportata in regime ordinario e straordinario ed indicazione della classe litologica prevalente (ghiaie o sabbie).

A titolo di esempio, in *Figura 8* la linea blu rappresenta l'alveo inciso nel 2002, le aree gialle le barre già esistenti nel 1982, le aree verdi le barre (depositi) formatesi tra il 1982 ed il 2002, le aree rosse gli arretramenti della linea di sponda (erosione) verificatesi nel periodo 1982 - 2002. La CTR (sfondo) evidenzia che le modificazioni più consistenti si sono verificate dopo il maggio-giugno 1994. La grossa barra in destra idrografica era un'isola fluviale nel 1982 (giallo); essa ha subito un modesto accrescimento tra il 1982 ed il 1994 (isola CTR sullo sfondo) ed un successivo, consistente ampliamento della forma tra il 1994 pre-alluvione ed il 2002, con contestuale riempimento del canale in destra e collegamento fisico dell'isola alla sponda. In sinistra, dalla linea di sponda CTR sullo sfondo si rileva come gran parte dell'erosione e dell'arretramento della sponda sia avvenuto successivamente al 1994.

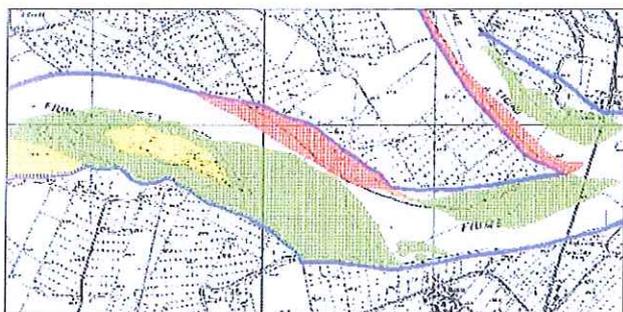


Figura 8 - Modificazioni planimetriche 1982-2002, sovrapposte alla CTR Lombardia 1994.

La quantificazione volumetrica delle modificazioni delle forme di erosione e di deposito è stata eseguita a partire dalla misura delle loro superfici, moltiplicate per "l'altezza media" rappresentativa della forma stessa, rispetto alla quota di magra. Nella messa a punto della procedura di calcolo volumetrico, la problematica più impegnativa è consistita nella definizione dell'altezza media rappresentativa della forma in esame e nella stima dell'errore che si commette comparando superfici rilevate in epoche diverse, con livelli idrici di magra verosimilmente diversi.

Un primo approccio a tale problema è consistito nella verifica della documentazione fotografica, aerea, utilizzata per l'elaborazione delle carte geomorfologiche del 1982 e del 2002. Le carte furono realizzate con voli del 1980 e del 2002, entrambi eseguiti in condizioni di magra del corso d'acqua, in prima approssimazione ritenute comparabili.

Successivamente, è stato verificato il grado di variabilità dei livelli di magra agli idrometri, constatando variazioni scarsamente significative nei riguardi della sommergibilità delle barre e delle sponde, alla scala di analisi (1:10.000). Il confronto tra le carte geomorfologiche avrebbe pertanto fornito un errore dei valori delle modificazioni areali delle forme di erosione e deposito del tutto trascurabile, praticamente minore dell'errore di scala.

Appurato quanto sopra, per la determinazione della quota media rappresentativa del livello idrico di magra di riferimento,

sono state utilizzate le quote relative al 1994. Tale scelta è stata determinata anche dalla necessità di utilizzare la CTR Lombardia (scala 1:10.000) per eseguire la stima della quota media rappresentativa della superficie topografica delle forme. Infatti, questa rappresentazione era l'unica disponibile, in grado di fornire un numero di quote significative e omogenee per l'intero segmento fluviale esaminato. La quota media così ricavata è stata confrontata, per alcuni tratti locali di cui si aveva a disposizione il DTM del rilievo laserscanner, con quella ricavabile dal DTM medesimo. Si è quindi proceduto alla definizione puntuale dei livelli idrici di magra e alla loro distribuzione lungo l'intera asta fluviale, per "intervalli" determinati sulla base del gradiente idraulico del tratto fluviale in esame. Il risultato ottenuto è stato ulteriormente verificato sulla base delle sezioni rilevate nel 1999.

Definita l'altezza rappresentativa di ciascuna superficie rispetto al livello di magra di riferimento, è stato possibile calcolare il relativo volume. Il valore ottenuto rappresenta la variazione volumetrica, per una data forma, avvenuta tra il 1982 e il 2002. Le analisi così condotte hanno indotto a suddividere il segmento fluviale da foce Tanaro a foce Arda in cinque "tratti omogenei".

Il tratto omogeneo 1, da confluenza Tanaro alla località Pancarana, è contraddistinto da un alveo pluricursale, corrispondente alla zona distale del sistema "braided" del F. Po, in cui prevalgono, nelle forme di fondo, i fenomeni deposizionali. I depositi sono costituiti essenzialmente da ghiaie sabbiose, la cui composizione granulometrica, verso valle, appare spostarsi verso termini via via più ricchi in sabbia, contestualmente ad una diminuzione delle dimensioni dei ciottoli.

In questo tratto si arresta la quasi totalità dei depositi ghiaiosi in ingresso da monte, mentre solo la frazione sabbiosa sembra poter essere trasportata e depositata nei tratti successivi. Si rileva inoltre una condizione di sostanziale equilibrio tra il volume di sedimenti depositati come forme relativamente stabili (barre e accrescimenti di sponda) ed i volumi potenzialmente movimentabili dalle barre instabili. Anche il volume complessivamente eroso dalle sponde risulta confrontabile con quello complessivamente depositato nelle sponde in accrescimento.

Le determinazioni volumetriche hanno condotto alle seguenti stime globali:

- il volume complessivamente eroso dalle sponde e dalla rimobilizzazione delle barre, nel ventennio esaminato, risulta pari a circa $13,0 \cdot 10^6$ m³, di cui circa $6,9 \cdot 10^6$ m³ dalle sponde e $6,0 \cdot 10^6$ m³ circa dalle barre.
- il volume complessivamente depositato ammonta a circa $22 \cdot 10^6$ m³. I fenomeni deposizionali, per quanto attiene le forme di fondo, sono pertanto nettamente prevalenti rispetto a quelli di erosione;
- il volume medio annuo movimentabile nel tratto, in condizioni ordinarie, attraverso la ridistribuzione del materiale costituente le barre ed attraverso l'erosione delle sponde, è pari rispettivamente a 600.000 m³/anno (barre) e 700.000 m³/anno (barre + sponde). Tale intervallo di valori è rappresentativo della capacità di trasporto solido che il corso d'acqua ha nel tratto in questione;
- il 70% circa del materiale complessivamente eroso risulta essere stato mobilizzato in condizioni di regime straordinario. Invece, in condizioni ordinarie, si producono quasi solo erosioni del piede delle barre e, localmente, delle sponde, con progressivi franamenti e arretramenti dei fronti stessi. Questa dinamica trova riscontro anche nella morfologia delle barre, caratterizzate da altezze decisamente elevate rispetto alla quota di magra (altezza media per l'intero tratto pari a 3,5 metri con punte massime di oltre 6 - 7 metri, localmente confrontabili con la quota del piano golendale) e fronti molto inclinati, localmente sub-verticali.



Nel tratto omogeneo 2, da Pancarana a Pieve Porto Morone, il Po assume progressivamente i caratteri di un corso d'acqua monocursale, relativamente rettilineo o sinuoso, frutto soprattutto dei massicci interventi di rettificazione operati dall'uomo fino alla fine del XIX secolo. Come già detto all'altezza del meridiano passante per Portalbera (a monte confluenza Tidone), il F. Po intacca il substrato lapideo pre-quadernario, verosimilmente rappresentato dalla "culminazione assiale" in continuità con la "struttura geologica sepolta", affiorante in corrispondenza del "Colle di S. Colombano" e dello "Sperone di Stradella". Trattasi di rocce sedimentarie stratificate, a direzione circa NW-SE e immersione a SE. La singolare "deviazione" subita dall'alveo del F. Po in questo limitato settore, da E-W a NW-SE, potrebbe pertanto essere condizionata dalla direzione degli strati che ne avrebbero forzato la direzione di deflusso. La soglia naturale anzidetta influisce sulla naturale tendenza al deposito e sull'elevata propensione storica alla divagazione del fiume nel territorio posto immediatamente a monte di essa.

I materiali presenti come depositi sono costituiti essenzialmente da sabbie e ghiaietto; le ghiaie si riscontrano nell'alveo di magra e, localmente, alla base dei depositi sabbiosi costituenti le barre.

Le caratteristiche sostanziali di questo tratto sono:

- il volume complessivamente eroso dalle sponde e dalla rimobilizzazione delle barre, nel ventennio esaminato, risulta pari a circa $18,6 \cdot 10^6$ m³, di cui $16,7 \cdot 10^6$ circa dalle sponde e $1,9 \cdot 10^6$ circa dalle barre;
- il volume complessivamente depositato ammonta a $17,4 \cdot 10^6$ m³ circa, evidenziando una condizione di sostanziale equilibrio tra erosione e deposito nelle forme di fondo;
- il 71% circa del materiale complessivamente eroso dalle sponde e dalle barre risulta essere stato mobilizzato in condizioni di regime ordinario. Le modificazioni delle forme di fondo appaiono pertanto condizionate da un'attività relativamente distribuita nel tempo. Gli eventi di piena straordinari o comunque di intensità relativamente elevata contribuiscono ad innescare fenomeni di erosione di grosse proporzioni, la cui evoluzione, nella maggior parte dei casi, continua anche nelle condizioni di regime ordinario. Questa dinamica trova anche riscontro nella morfologia delle barre stesse, caratterizzate da altezze minori rispetto a quelle del tratto precedente, evidenziando una sensibilità idraulica più elevata (altezza media delle barre per l'intero tratto pari a 2,3 metri con punte massime di 5,5 metri circa) e fronti blandamente inclinati in continuità morfologica con l'alveo sommerso;
- il volume medio annuo movimentabile nel tratto in condizioni ordinarie, attraverso l'erosione delle barre e delle sponde, è compreso tra 430.000 m³/anno (barre) e 930.000 m³/anno (barre + sponde);

Nel tratto omogeneo 3, da Pieve Porto Morone a Isola Serafini, il Po si trasforma in un corso d'acqua decisamente monocursale, fortemente canalizzato e meandriforme. Si riscontra la presenza di isole fluviali di apprezzabili dimensioni.

I meandri appaiono "congelati" dalla presenza di importanti opere di difesa spondale e di arginatura, spesso realizzati in "froido". Inoltre, una buona parte della zona di valle, all'incirca tra Piacenza e lo sbarramento di Isola Serafini, risente dell'azione di rigurgito idraulico indotto dallo sbarramento stesso,

contribuendo a creare condizioni morfodinamiche di bassa energia³.

I materiali di deposito sono essenzialmente sabbie e ghiaietto. Le ghiaie analogamente al tratto precedente, si riscontrano localmente nell'alveo di magra e, più diffusamente, alla base dei depositi sabbiosi costituenti le barre.

Le caratteristiche sostanziali di questo tratto sono:

- il volume complessivamente eroso dalle sponde e dalla rimobilizzazione delle barre, nel ventennio esaminato, risulta pari a circa $5,0 \cdot 10^6$ m³, di cui $3,0 \cdot 10^6$ circa dalle sponde e $2,0 \cdot 10^6$ circa dalle barre;
- il volume complessivamente depositato ammonta a $10,7 \cdot 10^6$ m³ circa, evidenziando una tendenza all'incremento volumetrico delle forme di fondo. Infatti, è stata riscontrata una generale tendenza alla chiusura di gran parte dei canali laterali delimitanti alcune isole fluviali, con tendenza al collegamento fisico tra sponda e isola stessa;
- il 45% - 50% circa del materiale complessivamente eroso dalle sponde e dalle barre risulta essere stato mobilizzato in condizioni di regime ordinario. Le modificazioni delle forme di fondo appaiono pertanto condizionate in eguale misura dall'attività ordinaria e da quella straordinaria, verosimilmente anche a causa della presenza diffusa di opere di difesa spondale, che limitano i fenomeni erosivi durante la vita ordinaria del corso d'acqua; questa dinamica trova riscontro anche nella morfologia delle barre stesse, caratterizzate da altezze minori rispetto a quelle del tratto precedente, evidenziando una sensibilità idraulica ancora più elevata (altezza media delle barre per l'intero tratto pari a 1,7 metri con punte massime di 3,0 metri circa) e fronti delle barre in continuità morfologica con l'alveo sommerso;
- si ha una sensibile diminuzione del volume medio annuo movimentabile in condizioni ordinarie, attraverso l'erosione delle barre e delle sponde. Infatti risulta un valore compreso tra 230.000 m³/anno (barre) e 300.000 m³/anno (barre + sponde).

Il tratto omogeneo 4, da Isola Serafini alla confluenza del canale di restituzione della centrale, coincide con l'ansa meandrica di Isola Serafini (Figura 9) sottesa dall'omonima centrale idroelettrica. In relazione alle citate modalità di conduzione dello sbarramento, per la maggior parte dell'anno il tratto del meandro compreso tra lo sbarramento e foce Adda è privo di portata, mentre nel successivo tratto fino alla confluenza con il canale di restituzione della centrale la portata presente è sostanzialmente solo quella del F. Adda.

Ne consegue che la morfodinamica di questo tratto è in gran parte determinata dal citato regime intermittente prodotto dall'esercizio della centrale idroelettrica e del relativo sbarramento; in particolare i sedimenti possono essere trasferiti dal "tratto 3" al "tratto 4" solo saltuariamente quando in occasione delle piene le paratoie vengono aperte parzialmente o totalmente.

Le caratteristiche sostanziali di questo tratto sono di seguito sintetizzate:

- il volume complessivamente eroso dalle sponde e dalla rimobilizzazione delle barre, nel ventennio esaminato, risulta pari a circa $2,6 \cdot 10^6$ m³, di cui la quasi totalità dalle sponde (oltre l'80%), a conferma della pressoché mancanza di fenomeni erosivi delle barre, specialmente durante il regime ordinario del corso d'acqua;

³ Il disciplinare di regolazione delle paratoie dello sbarramento di Isola Serafini prevede il mantenimento a monte della centrale della quota di pelo libero pari a 41,00 m s. m.. Attualmente, per portate fino a 1'000 m³/s l'intera portata viene turbinata, by-passando quindi il successivo meandro naturale, mentre per portate superiori a circa 3'000 ÷ 4'000 m³/s la centrale interrompe la produzione, lasciando defluire l'intera portata nel detto meandro naturale.

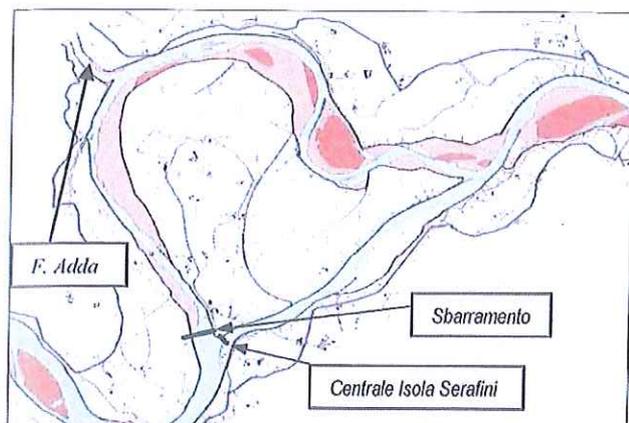


Figura 9 - Planimetria in corrispondenza di Isola Serafini.

- il volume complessivamente depositato ammonta a $5,7 \cdot 10^6$ m³ circa, evidenziando una tendenza all'incremento volumetrico delle forme di fondo, incremento verificatosi verosimilmente durante le due piene del '94 e del 2000; il 90% circa dei depositi delle barre risulta instabile, con scarsa altezza media (1,0 m);
- si ha una ulteriore sensibile diminuzione del volume medio annuo movimentabile in condizioni ordinarie, attraverso l'erosione delle barre e delle sponde. Infatti risulta un valore compreso tra 170.000 m³/anno (barre) e 250.000 m³/anno (barre + sponde).

Il tratto omogeneo 5, dalla confluenza del canale di restituzione della centrale fino a confluenza Arda, risente fortemente della dinamica "impulsiva" indotta dalla presenza di Isola Serafini, causa del trattenimento di gran parte dei sedimenti nei tratti precedenti, nonché della presenza di consistenti opere di regimazione, atte a mantenere condizioni favorevoli alla navigazione. Di conseguenza, nonostante nelle forme di fondo prevalgano sabbie, ghiaietto e solo in parte ghiaie, le connotazioni morfologiche delle barre sono del tutto simili a quelle del "tratto 1": altezza relativamente elevata e fronti fortemente inclinati.

Questo tratto, per quanto attiene le forme di fondo (barre), è caratterizzato in prevalenza da fenomeni di deposito, che prevalgono nettamente rispetto a quelli di erosione (di sponda e di barra).

Le sue caratteristiche sostanziali sono:

- il volume di materiale complessivamente eroso dalle sponde e attraverso la rimobilizzazione delle barre, nel ventennio esaminato, risulta pari a circa 700.000 di m³, di cui la quasi totalità dalle sponde;
- il volume complessivamente depositato ammonta a $4,4 \cdot 10^6$ m³ circa, evidenziando una tendenza all'ampliamento volumetrico delle forme di fondo.

È assai significativa la "convergenza geomorfologica" delle forme di fondo nei tratti 1 e 5, evidenziata dagli indici morfologici, nonostante questi siano caratterizzati da condizioni litologiche ed "ambientali" sostanzialmente diverse. Entrambi risentono di un'attività impulsiva dovuta nel primo caso alle caratteristiche morfodinamiche naturali del sistema "braided" e nel secondo caso dagli effetti prodotti dalla presenza dello sbarramento di Isola Serafini.

4.2 Le modificazioni del fondo alveo

Ai fini della valutazione dei termini ΣE_{fondo} e ΣD_{fondo} dell'equazione del bilancio, l'evoluzione del fondo alveo è stata analizzata utilizzando le sezioni topografiche rilevate dall'AIPO. I rilievi più significativi e quindi utili per l'analisi delle dinamiche in atto sono quelli del 1954, 1968/69, 1979, 1984, 1991 e 1999. In particolare il confronto tra i dati del 1999 con quelli del 1979 è coerente con il ventennio 1982 - 2002 preso in considerazione nell'analisi geomorfologica.

L'informazione disponibile a livello di sezioni risulta poco dettagliata, pertanto è possibile effettuare solo un'analisi relativa a "condizioni medie" con individuazione di "tendenze evolutive". Ciò nonostante il risultato numerico finale, pur interpolando sezioni in media distanti circa 6 km (29 sezioni in circa 170 km di fiume), è da ritenersi significativo.

Il confronto tra i profili longitudinali del talweg ricavati da detti rilievi mostra che lo stesso ha subito continui cambiamenti dovuti alla movimentazione delle barre e dei depositi spondali. L'irregolarità assai marcata di tali profili (Figura 10) non consente di determinare in modo sicuro l'evoluzione a grande scala del fondo alveo. È pertanto sembrato assai preferibile individuare tali linee evolutive confrontando non il talweg a varie epoche, ma i profili di pelo libero di magra. Questi infatti conducono ad una rappresentazione idraulica assai più rappresentativa per lo scopo di interesse, dal momento che il pelo libero si dispone sempre al di sopra delle irregolarità del fondo e con quote idriche sempre decrescenti verso valle.

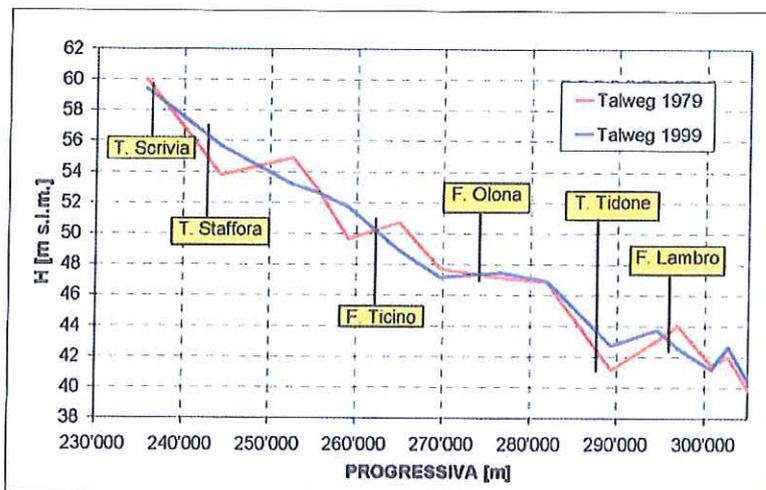


Figura 10 - Confronto andamento talweg 1979-1999.

Allo scopo si è utilizzato un modello idrodinamico a fondo fisso (Mike 11 del Danish Hydraulic Institute), per ricostruire i profili di pelo libero in condizioni di magra, utilizzando una portata costante di 100 m³/s che rappresenta un valore particolarmente basso, se paragonato alla capacità dell'intero alveo inciso.

La Figura 11 confronta i profili di pelo libero, qui indicati come "profili di fondo medio", così ottenuti per gli anni 1954, 1968/69, 1979, 1984, 1991 e 1999. Da tale confronto si possono trarre le seguenti osservazioni:

- si è verificato un generale abbassamento dell'alveo dal 1954 in poi per quasi l'intero tratto in studio, con dinamiche molto più accentuate nei primi 25 anni; tale dinamica è molto marcata a valle di Isola Serafini, dove tra il 1954 e il 1999 si sono calcolati abbassamenti di $4 \div 5$ m (tasso medio annuo di circa 10 cm); tale effetto è senz'altro dovuto agli effetti indotti dall'estrazione degli inerti che negli anni



60-70 è stata molto intensa. L'abbassamento è evidente anche nel ventennio 1979 ÷ 1999;

- anche nel tratto di monte, almeno fino a monte del ponte di Mezzana Corti, pochi chilometri a valle della fine del sistema braided, si riscontra un fenomeno di erosione del fondo alveo abbastanza costante negli ultimi vent'anni, in attenuazione procedendo da monte verso valle;
- il tratto compreso tra il ponte di Mezzana Corti e foce Trebbia è caratterizzato, a partire dal 1979, da una sostanziale stabilità, infatti nel ventennio si riscontrano variazioni contenute (non superiori al metro e quindi a 5 cm/anno) ed alterne (in alcune sezioni si verificano erosioni, mentre in altre si verificano deposizioni);
- nel tratto compreso tra foce Trebbia e la centrale di Isola Serafini si osserva, invece, a partire dal 1979 fino al 1999 un progressivo innalzamento delle quote di fondo medio, a dimostrazione che il suddetto tratto è caratterizzato da una tendenza al deposito sul fondo alveo;
- il tratto a valle di Isola Serafini fino alla confluenza con il fiume Arda, presenta notevoli abbassamenti del fondo alveo, non solo considerando l'intervallo temporale 1954 - 1999, ma anche l'ultimo ventennio compreso tra il 1979 e il 1999. Ne sono testimonianza le perdute funzionalità delle conche di navigazione di Isola Serafini e del porto di Cremona.

I due ultimi fenomeni, deposito tra Piacenza e Isola Serafini ed erosione tra Isola Serafini e il fiume Arda, sono tra loro correlabili e spiegabili con la presenza dello sbarramento di Isola Serafini. Questo induce infatti un rallentamento della corrente a monte e quindi condizioni medie che favoriscono la deposizione con una sezione liquida molto ampia ed una concentrazione della corrente a valle in sezioni ristrette con sponde "corazzate" e quindi condizioni medie che favoriscono l'erosione del fondo.

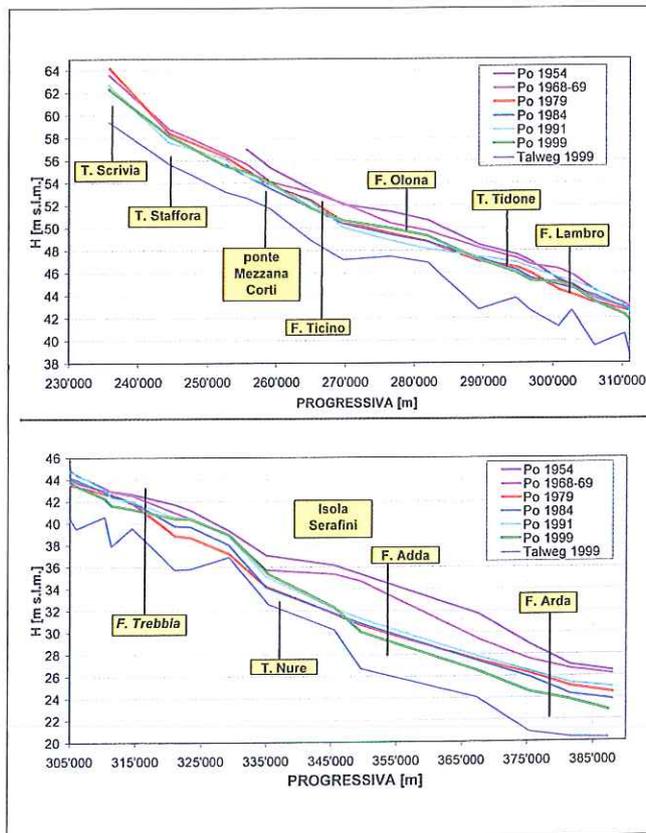


Figura 11 - Evoluzione fondo medio alveo dal 1954 al 1999.

Il passaggio dalle variazioni delle quote di fondo medio alla stima dei volumi complessivamente erosi e depositati sul fondo alveo è stato condotto come segue:

- determinazione della superficie dell'alveo di magra compreso tra due sezioni, utilizzando sia la carta geomorfologica del 1982 che quella del 2002: tale superficie è individuata nell'ambito dell'alveo inciso al netto di tutte le forme censite nell'attività di caratterizzazione geomorfologica;
- determinazione della superficie media tra quelle precedentemente misurate;
- moltiplicazione di tale superficie per la media della variazione di quota del fondo alveo relativa a ciascuna delle due sezioni estreme;
- la somma algebrica dei volumi così ottenuti determina l'andamento dei volumi complessivamente movimentati sul fondo alveo.

In Figura 12 è rappresentata, a titolo di esempio, una sezione d'alveo con gli elementi utili a comprendere la sopra citata metodologia. Nella stessa figura è riportato anche il deposito di barra formatosi tra il 1982 e il 2002 desunto dall'analisi geomorfologica.

I risultati ottenuti sono rappresentati nel grafico di Figura 13. I tratti di linea con pendenza verso il basso indicano fondo in erosione, mentre i tratti con pendenza verso l'alto indicano fondo in deposito. A ulteriore conferma delle precedenti considerazioni circa l'influenza dello sbarramento di Isola Serafini, notevole interesse presenta la "campana" di Piacenza e foce Arda: durante il ventennio nel tratto tra Piacenza e lo sbarramento si è depositato un volume (circa $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) pari a quello eroso a valle di esso fino alla confluenza con il fiume Arda.

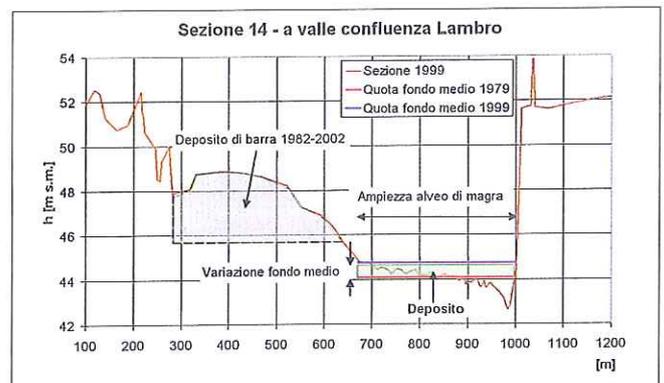


Figura 12 - Volume eroso e depositato nella barra e nel fondo alveo in corrispondenza della sez. 14.

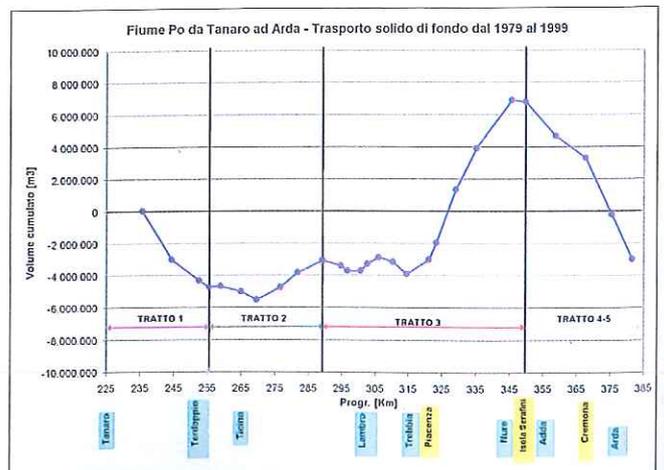


Figura 13 - Volume eroso e depositato lungo il fondo alveo.



4.3 I contributi esterni al sistema

Per completare il bilancio del trasporto solido secondo la metodologia precedentemente descritta è necessario definire i contributi "esterni" al sistema: gli apporti *Af* dagli affluenti e le estrazioni *Estr*. Purtroppo le informazioni in proposito disponibili presentano livelli di incertezza superiori rispetto agli elementi conoscitivi derivanti dall'analisi geomorfologica e dall'analisi idraulica.

4.3.1 Apporti dagli affluenti

Tra gli studi consultati quello di maggior completezza per le informazioni ricercate è il Sottoprogetto SP4 "Compatibilità delle attività estrattive" (Autorità di Bacino del Fiume Po, 1995), in particolare l'attività 4.8 "Definizione di un modello di bilancio del trasporto solido nel bacino".

Lo studio, pur essendo basato su metodologie a carattere sintetico difformi da quelle applicate nel presente lavoro (l'apporto dei bacini montani è calcolato mediante il metodo di Gavrilovich e l'apporto effettivo dei tratti di pianura è calcolato mediante il confronto dei rilievi multitemporali in corrispondenza delle sole sezioni rilevate, nonché con l'applicazione di formulazioni teoriche di calcolo della capacità di trasporto nei casi in cui si disponeva di un solo rilievo) è stato scelto in quanto affronta la tematica del trasporto solido nell'intero bacino del fiume Po e quindi fornisce dati tra loro omogenei su tutti gli affluenti nel tratto in studio, oltre che sull'asta del fiume Po a monte di confluenza Tanaro.

La *Tabella* seguente riporta l'apporto medio annuo calcolato nel citato studio per ciascun affluente.

TABELLA 1 - Apporto solido medio annuo proveniente dagli affluenti (sottoprogetto SP4 dell'AdB Po)

CORSO D'ACQUA	PROG. PO	APPORTO ANNUO
	[m]	[m ³]
PO monte	224'300	480'452
TANARO	224'600	101'058
SCRIVIA	237'600	16'318
AGOGNA	238'900	12'190
CURONE - STAFFORA - TERDOPPIO	255'300	15'000
TICINO	269'400	398'124
OLONA - TIDONE	297'100	10'000
LAMBRO	305'100	35'721
TREBBIA	326'300	28'931
NURE	345'900	3'307
CHIAVENNA	355'100	2'286
ADDA	362'600	136'892

I dati sopra calcolati non risultano temporalmente omogenei con l'orizzonte temporale del presente studio (1982-2002), in quanto la produzione di carico solido dei bacini montani si riferisce al periodo 1949-1978; l'analisi condotta nel medesimo Sottoprogetto SP4, in merito alla sostanziale invarianza degli apporti delle zone di monte nel trentennio considerato, ha portato ad assumere come valido tale insieme di dati.

I valori sono stati unicamente rimodulati considerando che nei 20 anni di indagine 1982 - 2002 si sia avuto un apporto pari ad almeno 22 anni, dal momento che, mentre le stime del sottoprogetto SP4 si riferiscono all'anno medio, nel ventennio si sono verificate due piene straordinarie (1994 e 2000), ognuna delle quali potrebbe avere verosimilmente contribuito a pro-

durare un apporto concentrato di trasporto solido pari al valore medio annuo.

4.3.2 Estrazioni

La stima della voce in oggetto, che dovrebbe costituire una certezza in quanto normata ed assentita caso per caso, di fatto presenta valori di elevata aleatorietà (dovuta alla frammentazione dei dati (archiviati presso ciascuna sede operativa AIPO), all'imprecisa localizzazione delle singole autorizzazioni (in molti casi è noto unicamente il comune ove è stata concessa l'estrazione), all'esecuzione di svasi per motivi di sicurezza idraulica con archiviazione separata, all'effettiva durata della concessione e pertanto al periodo in cui viene prelevato il materiale ed infine alle estrazioni abusive, delle quali non è possibile conoscere né la localizzazione, né tanto meno la quantità.

Le sedi AIPO provinciali di Alessandria, Pavia, Piacenza e Cremona hanno fornito per l'intero periodo 1982 - 2002 e per il tratto di interesse compreso tra le foci Tanaro e Arda i seguenti quantitativi autorizzati:

- AIPO Alessandria: 416'000 m³;
- AIPO Pavia: 3'780'000 m³;
- AIPO Piacenza: 3'695'000 m³;
- AIPO Cremona: 748'000 m³;
- Totale: 8'639'000 m³.

Per le considerazioni precedenti è da ritenere che tali dati presentino minor affidabilità rispetto alle stime quantitative condotte con la metodologia citata sulle erosioni e depositi di sponde, barre e fondo alveo. Tuttavia, occorre anche tener conto che nel periodo di analisi (1982-2002) le estrazioni dai corsi d'acqua, a seguito di apposite normative, sono state di fatto impedito o quanto meno assai limitate ad eccezione di quanto già assentito in passato e non ancora esaurito. Risulta in ogni caso fondamentale che si possa realizzare un archivio unico dei dati estrattivi con controllo ed aggiornamento annuale.

4.4 Il bilancio del trasporto solido

L'evoluzione che si è riscontrata nel fiume Po nel periodo 1982-2002 è legata all'insieme di tutti gli elementi considerati, anche se la stima degli stessi è necessariamente approssimata.

Con l'applicazione dell'equazione del bilancio prima esposta al ventennio 1982 - 2002, si sono ottenute (*Figura 14*) le cumulate dei suoi singoli termini e globale.

Il primo aspetto di interesse che si ricava dall'analisi del grafico è una capacità globale di trasporto sostanzialmente omogenea da confluenza Tanaro a confluenza Trebbia pari in media a 500'000 ÷ 600'000 metri cubi all'anno; infatti il trasporto solido lungo la progressiva (linea blue scuro) oscilla per l'intero ventennio indagato tra circa 11•10⁶ m³ e 15•10⁶ m³. Le oscillazioni maggiori in positivo si evidenziano in corrispondenza degli affluenti (Tanaro e Ticino) a cui seguono tratti, più o meno lunghi, in cui la dinamica fluviale tende a ridistribuire il "carico eccedente" ricevuto in modo da riportarsi al valore caratteristico. È una dinamica che risulta particolarmente evidente a valle della confluenza del fiume Ticino: infatti tale affluente è in grado di raddoppiare l'apporto solido, ma nei successivi 25 km circa (sino alla progressiva km 294, a monte della confluenza con il Tidone) la portata solida tende progressivamente a diminuire fino a riportarsi al valore caratteristico sopraccennato.

Tale equilibrio viene alterato approssimandosi a Isola Serafini. Nel tratto a valle di Piacenza infatti si manifesta la seguente dinamica:

- planimetricamente l'alveo inciso appare sostanzialmente fermo, in quanto i fenomeni di accrescimento o erosione di sponda e/o barra sono pressoché nulli a partire dalla confluenza Trebbia (progressiva km 324);



- non sono presenti apporti significativi dagli affluenti (Tidone, Lambro, Trebbia, Nure);
- il regime delle estrazioni si mantiene significativo e in linea con i tratti di monte;
- il fondo presenta una dinamica di deposito.

Detta dinamica culmina con il pressoché totale azzeramento del trasporto solido in corrispondenza di Isola Serafini, come evidenzia il ramo decisamente discendente della linea blu. A valle dello sbarramento, invece, si manifesta un progressivo aumento del trasporto solido, con recupero di circa il 50% del valore di monte ($5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ nel ventennio) entro il termine del tratto in studio (36 km fino a confluenza Arda) con tendenza costante ed omogenea. Tale recupero è determinato dall'abbassamento del fondo alveo che risulta solo in parte compensato dalla formazione di barre.

Il modello utilizzato consente quindi di leggere il bilancio di trasporto solido nelle sue varie componenti e di attribuire a ciascuna di esse il corretto peso nell'evoluzione del ventennio. Osservando in proposito la sostanziale confrontabilità tra volumi complessivi di erosione e di deposito, ciò che implica che le fonti degli apporti solidi che si arrestano nei depositi sono costituite sostanzialmente dalle erosioni, si evidenzia l'assoluta necessità che tale meccanismo non venga alterato da estrazioni incontrollate di inerti. In altri termini l'estrazione di inerti da una o più barre può ripercuotersi in una carenza di sedimenti dannosa per il mantenimento dell'equilibrio dinamico del trasporto solido. Per contro può essere ammessa la movimentazione artificiale dei sedimenti da un'area fluviale ove i depositi costituiscono fonte di pericolo ad un'altra area fluviale in cui gli stessi possano essere proficuamente depositati; infatti, tale movimentazione, se coerente con le analisi del trasporto solido qui esposte, può essere definita in modo da non perturbare l'equilibrio morfologico complessivo.

4.5 L'analisi idraulica delle forme in alveo

Tutte le forme prima illustrate sono anche state classificate e caratterizzate in relazione al loro comportamento idraulico. In particolare mediante modellazione monodimensionale a fondo fisso (modello Mike 11, prima citato) sono state ricavate le seguenti informazioni:

- portata limite di sommergenza di ogni elemento morfologico (barre, isole);
- effetti sulla capacità idraulica e sulle caratteristiche dell'alveo inciso che potrebbero derivare da eventuali interventi di rimozione di sedimenti e di rimodellamento degli elementi morfologici più importanti, fra cui:
 - riduzione in altezza delle dimensioni di alcune barre presenti nel tratto di fiume compreso tra la foce del Tanaro e la località di Pancarana;
 - abbassamento dell'isolotto Maggi e/o riapertura del canale in sponda destra, in corrispondenza di Piacenza;
 - riapertura del canale in sponda destra dell'isola presente in località Boscone Cubani e in sponda sinistra dell'isola presente in località Mezzana Vigoleno.

Per il tratto di fiume compreso tra foce Tanaro e Pancarana, punto dal quale il corso d'acqua perde la configurazione "braided", si è ipotizzata una massiccia ed estesa asportazione di materiale in corrispondenza di barre stabili, ricoperte da vegetazione o alberate, che non hanno subito modifiche nell'arco temporale nel periodo 1982 - 2002. È risultato che tali ipotetiche estrazioni, pur di entità macroscopicamente eccessiva (circa $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), sarebbero del tutto ingiustificate tenendo conto delle gravi conseguenze morfologiche e ambientali indotte nel corso d'acqua. In particolare gli effetti si concretizzerebbero in una riduzione solo locale dei tiranti idrici contenuta nell'ordine di qualche decina di centimetri, in corrispondenza di portate variabili tra $4'000$ e $9'000 \text{ m}^3/\text{s}$, e ancora minore per le portate

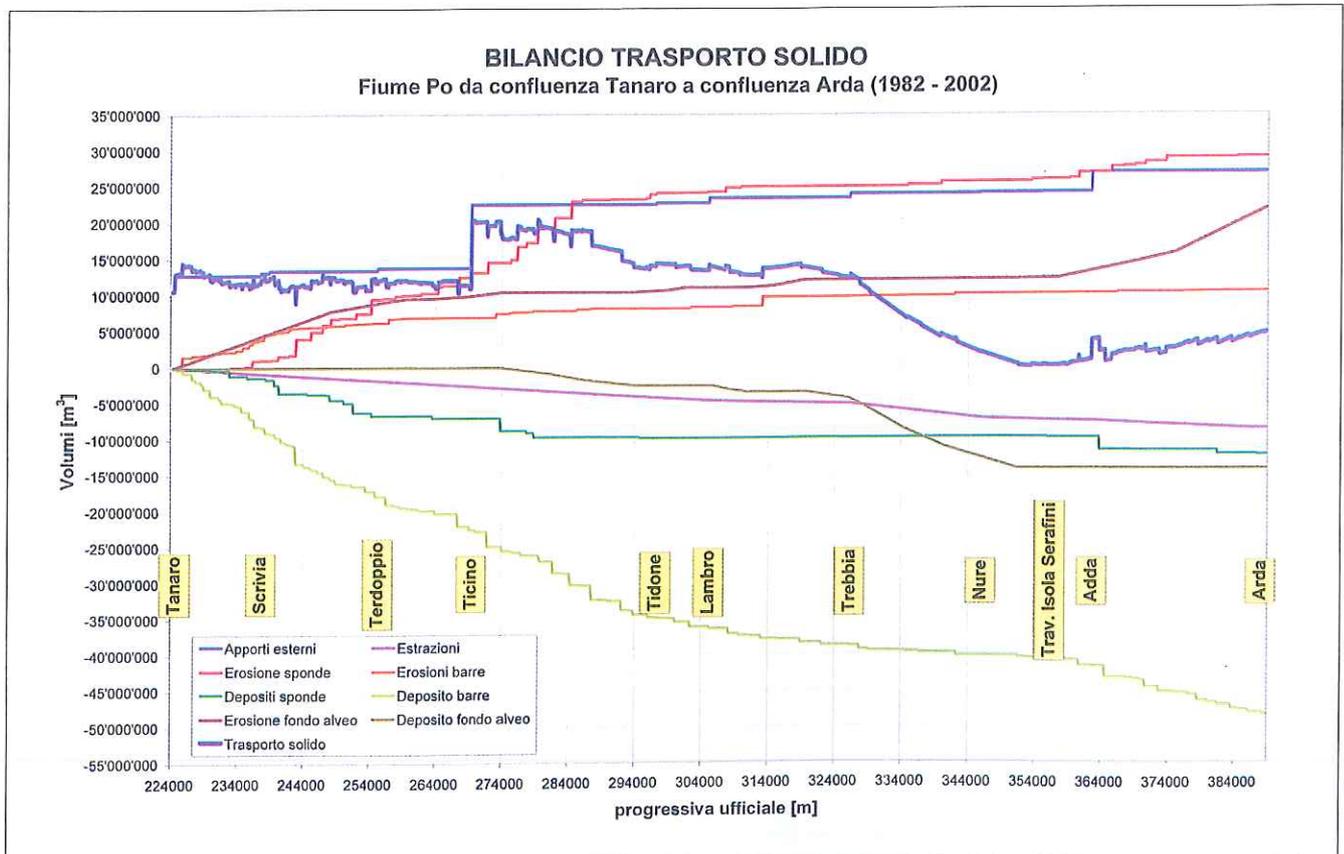


Figura 14 - Andamento del bilancio del trasporto solido lungo l'asta indagata nel periodo 1982 - 2002.

di massima piena. Anche con riferimento all'ipotesi di abbassamento di circa 2 - 4 m dell'isolotto Maggi presente in prossimità di Piacenza, le risultanze delle analisi idrauliche condotte hanno evidenziato una scarsa influenza in termini di incremento della capacità idraulica dell'alveo e di riduzione dei tiranti idrici per portate variabili tra 4'000 m³/s e 9'000 m³/s. Tuttavia, la piena riattivazione dei rami fluviali oggi scarsamente attivi in corrispondenza delle isole sopra indicate si dimostra favorevole in quanto, oltre a essere compatibile con le esigenze morfologiche e ambientali, produrrebbe effetti idraulici positivi per la redistribuzione della corrente e la conseguente riduzione della sua azione erosiva.

5. IL PROGRAMMA GENERALE DI GESTIONE DELL'ALVEO INCISO DEL PO

Anche se questo articolo è dedicato alla presentazione delle metodologie di analisi della dinamica dei sedimenti dell'alveo inciso, possono essere di interesse alcuni brevi richiami alle ricadute da esse derivanti in merito al "Programma generale di gestione dell'alveo inciso del Po".

Il citato Programma generale si estrinseca infatti in tre capitoli principali che rispettivamente descrivono il quadro delle criticità connesse con l'assetto attuale del corso d'acqua, il quadro degli obiettivi di riassetto e il conseguente quadro degli interventi, reciprocamente legati in modo tale che a ciascuna criticità corrisponda un intervento coerente con gli obiettivi e che viceversa ad ogni intervento sia associato l'obiettivo che si vuole conseguire e la criticità a cui deve essere data risoluzione.

L'assetto attuale, rappresentato in una cartografia tematica in scala 1:25'000 (Figura 15), descrive tutti gli elementi significativi: alveo di magra, usi antropici (porti, approdi, derivazioni ad uso irriguo ed industriale, cave, pioppeti, ecc.), infrastrutture di attraversamento, argini, opere di difesa idraulica, caratterizzazione dello stato attuale dell'alveo inciso (forme di deposito, trasporto ed erosione).

Le opere di difesa idraulica sono state classificate in "opere strategiche" e "non strategiche", dove le prime rappresentano quelle opere realizzate a protezione di infrastrutture da salvaguardare (argini maestri, ponti, porti e moli d'attracco). Le opere strategiche, sono state suddivise a loro volta tra opere "soggette a sollecitazioni dirette" o "non soggette a sollecitazioni dirette", a seconda se siano o meno soggette all'azione della corrente idrica anche in condizioni di magra. Le opere non strategiche sono state, invece, suddivise in opere che "inducono sollecitazioni su opere strategiche" (argini maestri, opere di difesa strategiche) e che quindi svolgono un'azione dannosa nei riguardi delle stesse, e in opere che "non inducono sollecitazioni su opere strategiche".

I depositi di barra sono stati distinti tra quelli che possono indurre criticità da quelli che non inducono criticità o che inducono effetti positivi al sistema fluviale. L'eventuale condizione di criticità è determinata dalla sussistenza di una o più delle seguenti condizioni: il deposito indirizza la corrente ordinaria verso opere di difesa strategiche; il deposito limita gli

usi antropici (derivazioni per prese idriche, porti e approdi ad uso commerciale o industriale); il deposito è dotato di una copertura vegetale (arbustiva o arborea) che induce criticità idraulica; il deposito ha dimensioni tali da ridurre l'efficienza dell'alveo. I fenomeni di erosione sono stati valutati in relazione ai limiti dei fronti attivi e potenziali di erosione spondale e di barra.

Relativamente al bilancio del trasporto solido, nella cartografia dell'assetto attuale è riportato, per tratti omogenei, un indicatore di sintesi delle analisi descritte. L'asta fluviale è stata in particolare suddivisa in:

- tratti con tendenza globale al deposito (progressiva riduzione della portata solida);
- tratti con tendenza globale all'equilibrio (sostanziale invariabilità della portata solida);
- tratti con tendenza globale all'erosione (progressivo incremento della portata solida).

Gli obiettivi generali individuati per la gestione dei sedimenti sono:

- il mantenimento di condizioni di equilibrio in atto rispetto alle dinamiche in corso (evoluzione forme di fondo e fondo alveo, bilancio di trasporto solido);
- la correzione delle dinamiche in corso (evoluzione forme di fondo e fondo alveo, bilancio di trasporto solido) ove queste mostrino una tendenza a configurazioni morfologiche non in linea con le condizioni di sicurezza e stabilità delle opere e degli insediamenti o ad accentuare situazioni oggi ritenute non compatibili;
- il miglioramento della capacità di convogliamento delle portate di piena con particolare riguardo ai tratti canalizzati, qualora le tendenze in atto siano tali da ridurre sensibilmente tale capacità;
- il mantenimento di determinate condizioni di navigabilità turistiche e/o commerciali, compatibilmente con le finalità di carattere idraulico - morfologico e ambientale del corso d'acqua;
- il miglioramento dell'assetto ecologico del corso d'acqua.

Per quanto riguarda invece gli obiettivi locali, legati cioè agli elementi che caratterizzano l'assetto di progetto fluviale, sono stati individuati i seguenti elementi:

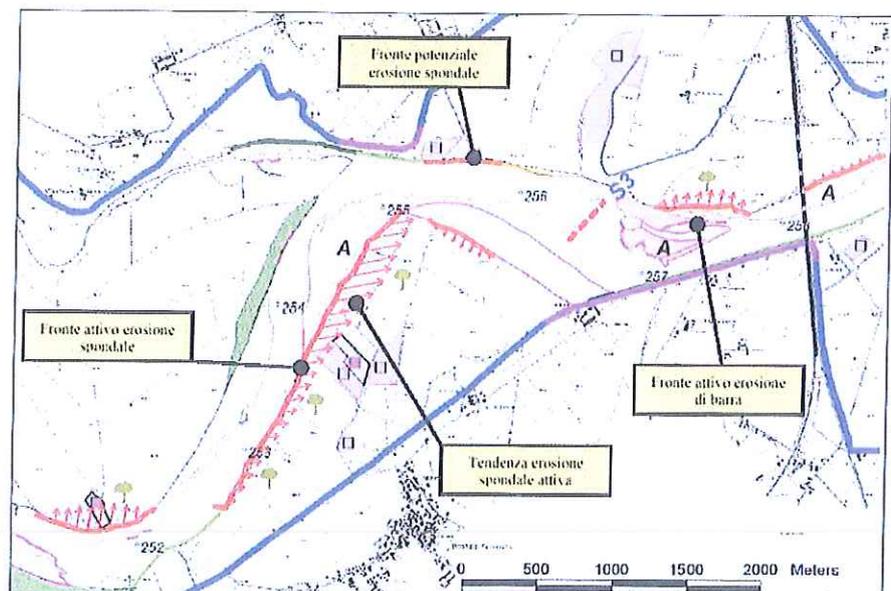


Figura 15 - Stralcio cartografico dello stato attuale.

- opere strategiche da salvaguardare (argini maestri, porti e principali approdi, opere di derivazione, ecc.);
- opere esistenti di difesa spondale strategiche (protezioni longitudinali delle sponde dell'alveo inciso, pennelli);
- fascia di salvaguardia delle opere strategiche in cui non risulta compatibile la divagazione dell'alveo inciso del fiume Po;
- configurazione planimetrica dell'alveo inciso compatibile con le opere strategiche e da salvaguardare.

Gli obiettivi citati in premessa (generali e locali) sono stati raccolti e rappresentati attraverso una cartografia tematica illustrativa (Carta degli obiettivi del corso d'acqua), in scala 1:25'000 (Figura 16).

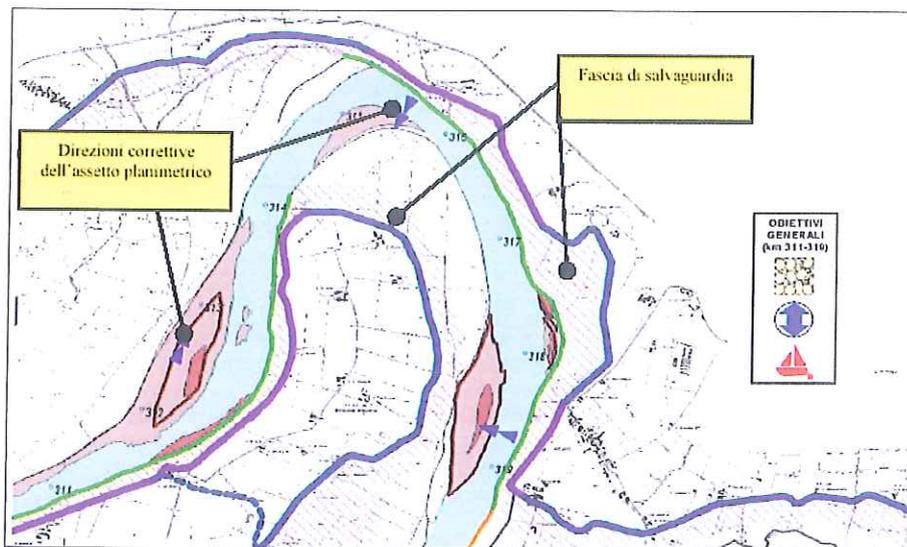


Figura 16 - Stralcio cartografico degli obiettivi del corso d'acqua.

L'individuazione degli interventi di riassetto del corso d'acqua è scaturita dal confronto tra i prima citati elementi di criticità e gli obiettivi di riassetto. I diversi interventi sono stati classificati in:

- interventi strutturali strategici di carattere straordinario;
- interventi strutturali strategici di carattere ordinario;
- interventi non strutturali strategici di carattere ordinario;
- interventi locali.

Nella prima categoria rientrano principalmente gli interventi relativi alla dismissione o modifica delle opere di difesa esistenti, alla realizzazione di nuove opere di difesa, alla movimentazione e/o asportazione di materiale litoide a fini correttivi di criticità morfologiche dell'alveo. In particolare sono previste essenzialmente due tipologie, entrambe riconducibili all'obiettivo di correggere l'assetto planaltimetrico dell'alveo al fine di ridurre l'azione idrodinamica della corrente attualmente diretta contro opere di difesa strategiche. Tali tipologie sono:

1. riapertura di canali laterali delle isole, attualmente occlusi in seguito a fenomeni di deposito (es.

a Boscone Cusani, Mezzano Vigoleno e in corrispondenza dell'Isolotto Maggi a Piacenza), e movimentazione di barre (nel meandro di Isola Serafini);

2. rimodellamento delle superfici golenali finalizzato a favorire il raggiungimento di un nuovo assetto dei meandri che attualmente presentano una configurazione planimetrica non naturale e dovuta alla realizzazione di irrazionali opere di difesa comportanti condizioni di criticità nei confronti di opere strategiche (meandri di Mortizza e confluenza T. Nure).

Nella seconda categoria fanno parte gli interventi di movimentazione di materiale litoide dal fondo alveo al fine di garantire la continuità del trasporto solido e il ripascimento dei tratti attualmente soggetti ad erosione del fondo, qualora tale fenomeno non sia accettabile (es. estrazione

di inerti nel tratto in deposito a monte dello sbarramento di Isola Serafini e loro restituzione in alveo nel tratto in erosione a valle dello sbarramento). In tale categoria rientrano inoltre gli interventi di manutenzione da attuare sulla vegetazione arborea. Essi sono da prevedere essenzialmente in corrispondenza dei pioppeti posti a tergo di sponde in erosione.

Nella terza categoria, rientrano tutti quegli interventi di tipo non strutturale, rappresentati da azioni di controllo e di monitoraggio dei fenomeni in atto (erosioni spondali, depositi di barre) e dello stato di consistenza delle opere di difesa.

Nell'ultima categoria di interventi rientrano quelle misure volte a risolvere criticità locali, legate soprattutto ad utilizzi antropici, per le quali vengono forniti criteri e prescrizioni,

senza entrare nel merito dei singoli interventi.

Tutti gli interventi sopracitati (strutturali e non strutturali) sono stati raccolti e rappresentati in una cartografia tematica (Carta degli interventi sul corso d'acqua), in scala 1:25'000 (Figura 17).

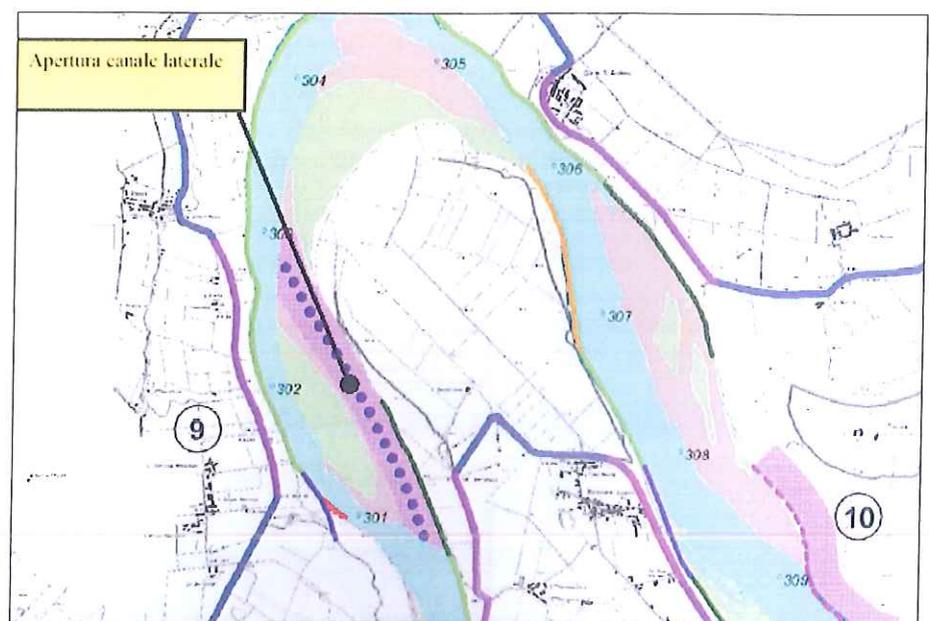


Figura 17 - Stralcio cartografico degli interventi di gestione dei sedimenti.



6. CONCLUSIONI

La dettagliata conoscenza della morfologia fluviale e delle sue caratteristiche idrauliche ha permesso di ben interpretare la dinamica evolutiva dell'alveo inciso e di quantificare il trasporto solido nei diversi tratti indagati del F. Po.

È da sottolineare come, sia proficuo il connubio tra le indagini morfologiche di campo, assolutamente decisive per il successo delle interpretazioni, e un prudente ed oculato uso della modellazione matematica oggi disponibile. Da questo approccio sperimentale - modellistico scaturiscono numerosi vantaggi: un deciso miglioramento delle conoscenze dello stato di fatto e delle sue tendenze evolutive, nuovi elementi per la programmazione delle necessarie attività integrative di monitoraggio, una migliore individuazione delle future attività di modellazio-

ne matematica di dettaglio, differenziandone e classificandone le caratteristiche in funzione delle finalità e delle esigenze generali o locali.

La conseguente messa a punto del "Programma di gestione dei sedimenti del F. Po.

Tratto confluenza Tanaro - confluenza Arda" offre ora alle Autorità competenti uno strumento adeguato per l'adozione di corrette politiche di gestione dei sedimenti atte ad evitare il protrarsi di situazioni di grave disequilibrio ieri e oggi lamentate. Tale Programma conduce infatti, sulla base del quadro delle criticità connesse con l'assetto attuale del corso d'acqua, a definire il quadro degli obiettivi di riassetto e la conseguente fattibilità degli interventi associati agli obiettivi che si vogliono conseguire e alle criticità a cui deve essere data risoluzione.

**BIBLIOGRAFIA**

- Alonso C. V., "Sediment deposition on stable gravels", *Advances in Hydro-Science and Engineering*, Vol. 1, S.S.Y. Wang (ed.), 1993, pp. 251-256.
- Autorità di Bacino del Fiume Po, *Studio di fattibilità degli interventi di gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo del fiume Po. Tratto confluenza Tanaro – confluenza Arda*, Parma, 2005.
- Autorità di Bacino del Fiume Po, *Sottoprogetto SP4 "Compatibilità delle attività estrattive"*, Parma, 1995.
- Billi P., "Forme di fondo grossolane", *Rivista di geologia sedimentaria e geologia marina: i depositi continentali*, Serie 3°, Vol. 50, n. 1-2, 1988, pp. 15-26.
- Billi P., "Morfologie fluviali", *Rivista di geologia sedimentaria e geologia marina: i depositi continentali*, Serie 3°, Vol. 50, n. 1-2, 1988, pp. 27-38.
- Billi P., Paris E., "Bed sediment characterization in river engineering problems", in *Erosion and Sediment Transport Monitoring in River Basins*, IAHS Publ. n. 210: 11-20, 1992.
- Brath A., Lamberti A., Montanari A., "Lo studio dei fenomeni fluviali mediante modelli fisici, in L'ingegneria naturalistica nella sistemazione dei corsi d'acqua", a cura di U. Maione e A. Brath, *Atti del Corso di Aggiornamento*, Editoriale BIOS, Milano, 1999.
- Bridge J. S., Jarvis J., "Flow and sedimentary processes in the meandering river South Esk, Glen Clova, Scotland", *Earth Surface Processes and Landforms*, 1: 3003-336, 1976.
- Brioschi F., *Carta topografica del corso del fiume Po da Moncalieri al mare Adriatico*, 1874.
- Bunte K., Abt S., "Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel- and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring", USDA, Forest Service, *Rocky Mountain Research Station*, General Technical Report RMRS-GTR-74, 2001.
- Butler J. B., Lane S. N., Chandler J. H., "Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing", *Journal of Hydraulic Research*, 2000.
- Cati L., *Idrografia e Idrologia del Po* (Pubblicazione n. 19 dell'Ufficio Idrografico del Po, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 1981.
- Chuech M., "Channel morphology and typology", in *The Rivers Handbook*, Vol. 1. P. Calow and G. E. Petts, eds. Blackwell Science Ltd., Oxford, UK, 1992, pp.126-143.
- Ciavola P., Perini L., Luciani P., Armaroli C., "Il rilievo Lidar della costa dell'Emilia Romagna: uno strumento per la valutazione dell'impatto delle mareggiate sulle zone costiere e per la caratterizzazione della morfodinamica delle spiagge", *Hydrogeo*, Maggioli Editore, 2006.
- Guerrero M., Lamberti A., "Modelli a fondo mobile nella progettazione di grandi opere fluviali. Due esempi di indagine sul fiume Po", *L'Acqua*, n. 3, 2004.
- Ham D., Chuech M., *The sediment budget in the gravel-bed reach of Fraser River: 2003 revision*, Department of Geography The University of British Columbia – Vancouver, British Columbia, 2003.
- Jansen P. Ph., van Bendegom L., van den Berg J., de Vries M., Zanen A., *Principles of River Engineering (The Non-Tidal Alluvial River)*, Pitman Publishing Limited. London 1979.
- Leopold Luna B., *A View of the River*, Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts, London, England 1994.
- Maraga F., *Riduzione del campo di attività fluviale e disponibilità di sedimento nei tratti d'alveo pluricursali: casi di studio nella pianura padana*. Estratto da " Fenomeni di erosione e alluvionamenti degli alvei fluviali" a cura dell'Università degli studi di Ancona, Facoltà di Ingegneria, Dip. di Sc. dei Mat. e della Terra, 1991.
- Ori G., "Facies e geometrie deposizionali dei sedimenti fluviali", *Rivista di geologia sedimentaria e geologia marina: i depositi continentali*, Serie 3°, Vol. 50, n. 1-2, 1988, pp. 39-68.
- Paris E., "Sulla dinamica delle correnti in alvei mobili", *Rivista di geologia sedimentaria e geologia marina: i depositi continentali*, Serie 3°, Vol. 50, n. 1-2, 1988, pp. 5-13.
- Richards K., *Rivers (Form and Process in Alluvial Channels)*, Methuen, New York, 1982.
- Rosgen D.L., *Applied River Morphology*. Wildland Hydrology, Pagosa Springs, Colorado, 1996.
- Thome C. R., *Stream Reconnaissance Handbook*, 1999.
- Vari, *Po AcquaAgricolturaAmbiente, L'Alveo e il Delta*, Società Editrice il Mulino, Bologna, 1990.
- Yang C. T., *Sediment Transport. Theory and Practice*. McGraw-Hill, New York, 1996.