

La conoscenza delle forme e dei processi fluviali per la gestione dell'assetto morfologico del fiume Po

Andrea Colombo*, Federica Filippi

Autorità di bacino del fiume Po, Via Garibaldi 75 - 43100 Parma

* Referente per la corrispondenza: andrea.colombo@adbpo.it

Riassunto

La conoscenza dei processi idromorfodinamici che governano la generazione ed il modellamento delle forme fluviali è attività strategica e prioritaria per una corretta gestione dei corsi d'acqua, in ragione dell'alternarsi di diversi regimi di portata liquida e solida. Ad una gestione dei corsi d'acqua basata su approcci semplificati ed avente come oggetto sistemi fluviali il più possibile definiti nella forma e regolati nei processi è necessario sostituire una gestione finalizzata a garantire l'indispensabile equilibrio fra le esigenze, peraltro non sempre contrastanti, della sicurezza idraulica, dell'utilizzo delle risorse fluviali e del conseguimento del buono stato morfologico ed ecologico degli alvei fluviali. Per conseguire tali obiettivi è necessario in primo luogo studiare i corsi d'acqua ad una scala adeguata, passando da un approccio riduzionistico ad uno maggiormente olistico, in grado di descrivere la complessità del sistema fluviale, rappresentandola puntualmente nella sua evoluzione temporale e traendo da questa la conoscenza degli elementi di sintesi necessari per stimare con sufficiente approssimazione i principali trend evolutivi. L'attività conoscitiva recentemente sviluppata dall'Autorità di bacino nell'ambito del *Programma generale di gestione dei sedimenti del fiume Po* risponde a tali esigenze e ha consentito di individuare alla scala dell'intera asta fluviale soluzioni ai numerosi squilibri che, pur essendo già noti da tempo, non sono ancor oggi risolti e, in alcuni casi, si sono addirittura aggravati.

PAROLE CHIAVE: morfologia fluviale / bilancio dei sedimenti / gestione dei sedimenti / recupero morfologico / fiume Po / idromorfologia

Understanding river morphology and processes for managing the the Po river morphology

Understanding hydromorphodynamic processes is essential for a correct management of streams and rivers which are under different regimes of solid and liquid discharges, which in turn are driving both generation and evolution of fluvial shapes. In order to achieve these goals, it is necessary to avoid management options which are based on simplified approaches, aiming at the shape-simplification and process-control of rivers. The correct management should take into account the necessary balance between human demands of hydraulic safety and use of fluvial resources, along with the achievement of good morphological and ecological state. These goal can be achieved only with the support of a robust scientific knowledge of river systems, which is able to capture the complexity of fluvial systems and to represent their temporal evolution. The Po River Basin Authority strongly supported this scientific approach in order to implement *The Master Plan for the management of Po river sediments*, which allowed to find solutions for the main critical issues at the scale of the entire river basin. Such environmental problems, even if already known since almost two decades, have never been solved and often even worsened.

KEY WORDS: fluvial morphology / sediment budget / sediment management / morphological restoration / Po river / hydromorphology

INTRODUZIONE

Il modellamento dell'alveo dei fiumi a fondo mobile avviene attraverso fenomeni naturali di erosione del letto e delle sponde e di trasporto e deposizione dei sedimenti. Nel pensiero comune tali fenomeni di modellamento, con particolare riguardo alla formazione e alla traslazione delle forme fluviali (sabbioni, ghiaioni), sono interpretati come fonte di potenziale pericolo per la circostante regione fluviale e oggetto, a volte erro-

neamente e specialmente in seguito ad eventi di piena, di consistenti interventi di asportazione per la ricalibratura della sezione trasversale.

La necessità di "tener pulito" l'alveo viene da più parti segnalata come una priorità assoluta, alla quale il disalveo dello stesso viene, di conseguenza, associato senza precise valutazioni sugli effettivi vantaggi o svantaggi che tale tipologia di intervento può causare sulle

dinamiche fluviali in atto e senza una valutazione dei volumi di materiale da asportare in rapporto alle potenzialità medie annue di trasporto solido. Tali richieste non tengono conto che l'asta del fiume Po, come della maggior parte dei suoi affluenti, ha subito nel corso del XX secolo notevoli trasformazioni in conseguenza principalmente della forte pressione antropica che si è manifestata a partire dagli anni '50, in particolare con estrazione di inerti dall'alveo, costruzione di opere di canalizzazione, urbanizzazione di molte aree di pertinenza fluviale (RINALDI e SURIAN, 2005; RINALDI *et al.* in questo volume).

Tali modificazioni e, nello specifico, il forte fenomeno di approfondimento delle quote di fondo dell'alveo, hanno influenzato e influenzano tuttora negativamente la sicurezza idraulica delle arginature maestre poste in frodo all'alveo inciso, la qualità dell'ambiente fluviale, l'equilibrio dei processi di trasporto solido e di trasferimento alla costa dei sedimenti fluviali e la possibilità di utilizzo della risorsa idrica. Di conseguenza, anche alla luce delle novità introdotte dalla Direttiva 2000/60/CE, in materia di tutela e gestione delle risorse idriche, e della Direttiva 2007/60/CE, in materia di gestione del rischio idraulico, è obiettivo prioritario dell'azione dell'Autorità di bacino del fiume Po programmare una corretta gestione dell'alveo fluviale al fine di indirizzare l'evoluzione naturale ed indotta del corso d'acqua verso configurazioni morfologiche di maggiore equilibrio dinamico e di maggior valore ecologico, compatibilmente con le esigenze di sicurezza idraulica e con gli usi sostenibili delle risorse fluviali.

È ormai evidente che la gestione dei corsi d'acqua non può più essere affidata solamente alla realizzazione di opere, siano esse argini o difese spondali, ma deve essere compresa in un più ampio disegno strategico che consenta di recuperare la massima funzionalità complessiva del corso d'acqua tutelando e riattivando, dove ancora possibile, i processi morfologici naturali dell'alveo fluviale.

Sulla base di tali principi e nell'ambito dell'attività di attuazione del PAI (Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico), l'Autorità di Bacino del fiume Po ha emanato la *Direttiva tecnica per la programmazione degli interventi di gestione dei sedimenti degli alvei dei corsi d'acqua* (Deliberazione n. 9/2006) (di seguito nominata come Direttiva) ed ha adottato, quale prima attuazione di tale Direttiva il *Programma generale di gestione dei sedimenti del fiume Po*, nei seguenti tre stralci funzionali:

- Stralcio da confluenza Stura di Lanzo a confluenza Tanaro (Deliberazione n. 3/2008);
- Stralcio da confluenza Tanaro a confluenza Arda (Deliberazione n. 20/2006);
- Stralcio da confluenza Arda all'incile del Po di Goro

(Deliberazione n. 1/2008).

Il *Programma generale di gestione dei sedimenti* è, secondo la Direttiva, lo "strumento conoscitivo, gestionale e di programmazione degli interventi mediante il quale disciplinare le attività di manutenzione e sistemazione degli alvei comportanti movimentazione ed eventualmente asportazione di materiale litoide, nonché le attività di monitoraggio morfologico e del trasporto solido degli alvei". Gli elaborati dei tre stralci del *Programma generale* sono consultabili nel sito dell'Autorità di bacino del fiume Po (www.adbpo.it); i contenuti dello Stralcio da confluenza Tanaro a confluenza Arda sono inoltre descritti da PAOLETTI *et al.* (2007).

RIFERIMENTI METODOLOGICI GENERALI

Il *Programma generale di gestione dei sedimenti* del fiume Po si fonda su una dettagliata, estesa ed aggiornata attività conoscitiva delle forme e dei processi fluviali, di cui il presente articolo rappresenta una sintesi delle metodologie, dei principali risultati e dei possibili sviluppi futuri relativamente (i) alla valutazione del trasporto solido, attraverso l'utilizzo di un approccio geomorfologico e sedimentologico e (ii) alla definizione delle fasce di mobilità morfologica del fiume Po.

Valutazione del trasporto solido con un approccio morfologico e sedimentologico

L'approccio metodologico utilizzato per la valutazione dei processi di funzionamento del sistema fluviale consiste nella stima delle variazioni planimetriche e volumetriche dell'alveo (sia delle forme fluviali emerse che dell'alveo di magra) intercorse nell'arco degli ultimi venti anni, in analogia alle più recenti metodologie descritte da RINALDI (2006) e sperimentate nella gestione dei sedimenti del Lower Fraser River (CHURCH *et al.*, 2001).

Tale quantificazione volumetrica, insieme alla conoscenza degli apporti dei diversi affluenti e delle estrazioni concesse, consente di stimare, applicando l'equazione di continuità dei sedimenti lungo l'asta fluviale, il bilancio del trasporto solido ed in particolare i principali meccanismi di erosione e deposizione dei sedimenti.

La metodologia utilizzata, oltre a fornire localmente informazioni di elevato dettaglio sulle modificazioni intercorse nel tempo alle diverse forme fluviali, consente una valutazione delle principali criticità presenti nel trasferimento dei sedimenti lungo l'asta fluviale.

Si ritiene che tale approccio possa fornire una rappresentazione dell'evoluzione morfologica del corso d'acqua maggiormente attendibile rispetto al solo utilizzo di modellazioni matematiche che, in contesti complessi come quello del fiume Po, non riescono a consi-

derare i numerosi parametri che influenzano la dinamica fluviale.

Inoltre i risultati di tale metodologia forniscono un quadro di riferimento indispensabile per modellazioni bidimensionali a fondo mobile che, a scala locale, possono dare informazioni quantitative anche in relazione alla possibile evoluzione dei processi in atto.

Sono state infine condotte alcune analisi sedimentologiche allo scopo di interpretare meglio alcuni fenomeni legati, in particolare, a:

1. modalità di trasporto e deposito dei diversi materiali presenti nel Po, in particolar modo tra il sistema a canali intrecciati (*braided*) di monte e il tratto di valle monocursale;
2. caratterizzazione della composizione di barre prevalentemente sabbiose, presenti nei tratti situati a valle del sistema *braided*, nelle quali si riscontra la presenza di un substrato ghiaioso;
3. caratterizzazione e quantificazione dei sedimenti fini presenti nelle forme fluviali, che generalmente vengono trasportati in sospensione, ma che verosimilmente vengono depositati in particolari condizioni idrauliche (fase calante di una piena).

Le fasce di mobilità morfologica

Nell'ambito delle attività di Studio propedeutico al *Programma generale di gestione dei sedimenti* sono state delimitate le fasce di mobilità morfologica del fiume Po, utilizzando le metodologie messe a punto

negli Stati Uniti da RAPP e ABBE (2003) ed in Francia da MALAVOI *et al.* (1998).

In particolare sono state individuate le seguenti fasce di mobilità:

- lo **spazio di divagazione storico**, costituito dall'inviluppamento degli alvei storici occupati dal fiume Po nel corso degli ultimi cento anni a partire dal primo impianto IGM di fine '800 (Fig. 1);
- la fascia di potenziale divagazione a medio lungo termine, chiamata **fascia di tutela morfologico ambientale**, tracciata a partire dalla fascia di divagazione storica, ed escludendo da questa le aree soggette a usi del suolo in atto non compatibili con la dinamica morfologica, ancorché attivabile nel lungo termine, e le aree non più connesse alla dinamica fluviale per caratteristiche topografiche;
- la fascia di mobilità a breve termine, chiamata **fascia di mobilità di progetto**, tracciata come inviluppo delle seguenti porzioni di regione fluviale contigue all'alveo ordinario: aree potenzialmente interessate nel breve e medio termine da processi di erosione spondale da non contrastare per non alterare il bilancio del trasporto solido; aree riattivabili in seguito alla dismissione di opere di difesa spondale interferenti; aree riattivabili in seguito all'adeguamento delle quote dei pennelli di navigazione; aree comprendenti i rami e i canali laterali da rifunzionalizzare.

La fascia di mobilità di progetto corrisponde alla porzione di regione fluviale che il *Programma generale*

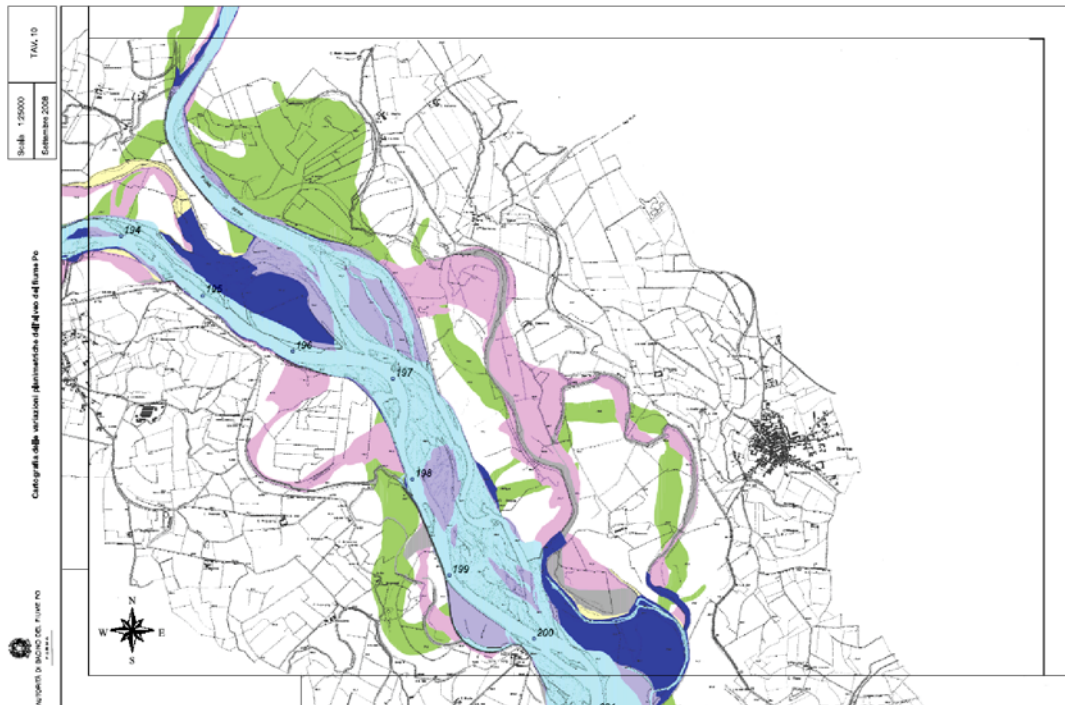


Fig. 1. Cartografia delle variazioni planimetriche dell'alveo del fiume Po (AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO, 2008).

di gestione dei sedimenti destina alla riattivazione di processi fluviali naturali a breve termine.

Nei capitoli successivi sono descritti i materiali utilizzati, le metodologie operative e i principali risultati conseguiti.

NUOVE CONOSCENZE: MATERIALI, METODOLOGIE OPERATIVE E PRINCIPALI RISULTATI

Per definire metodologie e strategie di gestione dei corsi d'acqua più sostenibili è necessario comprendere le trasformazioni in atto e prevederne la possibile evoluzione nello spazio e nel tempo, non solo in modo qualitativo e descrittivo, ma, per quanto possibile, in modo quantitativo.

Sull'asta principale del fiume Po, per la quale sono disponibili serie di dati storiche, oltre a recenti rilievi plano-altimetrici di elevata precisione e dettaglio (DTM da rilievo LIDAR), l'analisi è stata particolarmente dettagliata ed ha riguardato i seguenti aspetti:

- **forme fluviali** attuali e storiche dell'alveo fluviale;
- **caratteristiche dei sedimenti** associati con tali forme morfologiche: granulometria e litologia dei sedimenti delle barre e delle sponde;
- **processi di funzionamento del sistema fluviale** con particolare riguardo a quelli di produzione, flusso e immagazzinamento dei sedimenti lungo l'asta.

Le principali forme presenti nell'alveo del Po sono le barre, le isole, le sponde che delimitano l'alveo di magra ed i diversi rami laterali (Fig. 2). Com'è noto la morfologia di un corso d'acqua a fondo mobile è estremamente variabile nel tempo e le forme fluviali sono modellate in funzione di parametri quali il regime delle portate liquide e solide (variabili guida) e di parametri che caratterizzano le condizioni fisiche all'inter-



Fig. 2. Le forme dell'alveo del Po a confluenza Ticino (vista verso monte).

no delle quali scorre il fiume (condizioni al contorno) identificabili in particolare nella granulometria dei sedimenti, nelle caratteristiche della vegetazione ripariale oltre che nei diversi condizionamenti imposti dall'uomo (opere di difesa, infrastrutture).

Forme fluviali

L'estrema variabilità delle forme del fiume Po è stata analizzata a partire sia da descrittori di tipo topografico, quali le serie multitemporali di sezioni trasversale della regione fluviale o il profilo longitudinale del fondo, che da descrittori morfologici, quali la forma planimetrica, rappresentati in carte geomorfologiche di dettaglio ottenute attraverso analisi fotointerpretativa.

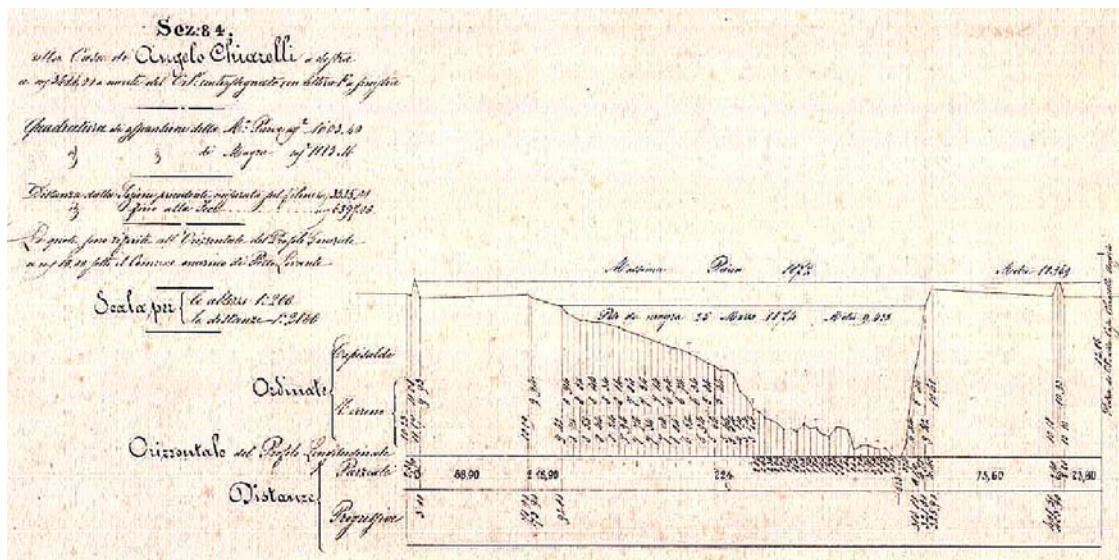


Fig. 3. Sezione topografica del fiume Po come rappresentata negli atti della Commissione Brioschi, 1873.

Dati topografici storici e recenti

Il fiume Po è stato oggetto, nel tempo, di rilevamenti sistematici di sezioni d'alveo, a partire dal 1873 dalla allora "Commissione tecnico-scientifica istituita con R. Decreto 16 febbraio 1873 per suggerire i provvedimenti di cui abbisogna il fiume", detta Commissione Brioschi (Fig. 3).

A partire dal 1954, fino al 2005, le sezioni storiche sono state oggetto di rilevazioni periodiche, con cadenza media decennale, realizzate prima dall'ex Magistrato per il Po e oggi da AIPO. Le rilevazioni sono in parte relative all'intera sezione dell'alveo, tra i due argini maestri (in particolare per le Sezioni Brioschi), e in parte limitate alla sola porzione incisa dell'alveo stesso e costituiscono parte della rete ufficiale di monitoraggio topografico del fiume Po (anni 1954, 1968/69, 1979, 1984, 1991, 1999 e 2004/2005). La Fig. 4

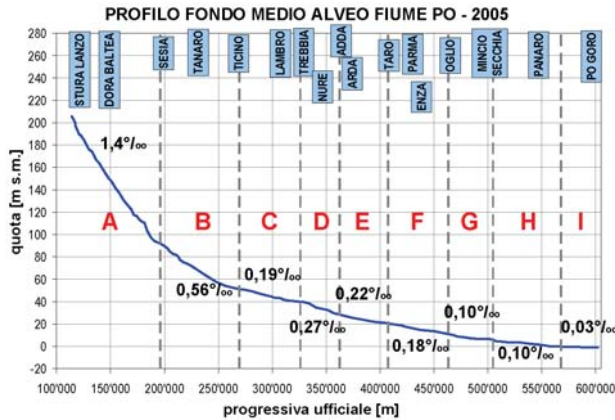


Fig. 4. Profilo di fondo medio dell'alveo del fiume Po, dal rilievo 2005.

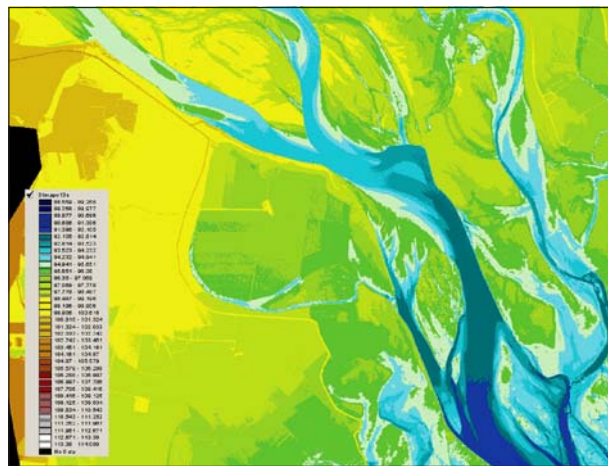


Fig. 5. DTM del fiume Po da rilievo LIDAR, rappresentazione delle classi di quote per scale di colore, a valle della confluenza del fiume Sesia nel Po.

rappresenta il profilo di fondo medio dell'alveo del fiume Po risultante dal rilievo topografico di terra più recente (AIPO, 2004/2005).

Negli ultimi anni l'Autorità di Bacino del fiume Po ha sperimentato l'utilizzo di moderni strumenti di modellazione tridimensionale del territorio, realizzati con tecnologia LIDAR quale tecnica primaria di acquisizione del dato tridimensionale del terreno (FILIPPI *et al.*, 2004). I lavori sono stati finalizzati alla determinazione dell'assetto piano-altimetrico del territorio di pertinenza fluviale del fiume Po definito da grigliati DTM a maglia pari a 2 m, rappresentazione geometrica del terreno, e dall'insieme delle *breakline*, il tutto acquisito con precisioni in quota pari a 30 cm (Fig. 5).

Le operazioni di rilievo della regione fluviale del fiume Po sono state eseguite in due anni. Nel 2004 si è proceduto al rilievo del terreno compreso nella fascia C del Po nel tratto che va da confluenza Pellice a confluenza Ticino (superficie = 736 km², lunghezza asta = 234 km). Nel 2005 è stato rilevato il terreno ricadente in fascia B del fiume Po, nel tratto che va da confluenza Ticino al Comune di Ariano nel Polesine (superficie = 550 km², lunghezza asta = 200 km). Su tale tratto il rilievo LIDAR è stato integrato con le batimetrie dell'alveo sommerso, attraverso l'ausilio di tecnologie *multibeam*.

Serie delle carte storiche e dei voli aereo-fotogrammetrici

Il patrimonio cartografico storico relativo al fiume Po è costituito da numerosi documenti di interesse sia storico documentale che tecnico, custoditi in fondi pubblici, come gli Archivi di Stato o il Fondo AIPO di Boretto, o presso archivi privati, molti dei quali ancora da recuperare e rendere accessibili per la consultazione tecnica.

Sono comunque complete e accessibili presso gli archivi dell'Autorità di bacino copie numeriche delle serie cartografiche storiche che rappresentano l'asta fluviale di Po, come ad esempio gli Atlanti prodotti dalla Commissione Brioschi a scala 1:50.000 (Fig. 6), le cartografie della prima levata IGMI a scala 1:25.000, le restituzioni aereo-fotogrammetriche alla scala 1:10.000 e 1:50.000 prodotte dall'ex Magistrato per il Po a corredo dei rilievi delle sezioni in alveo e golena e dei profili arginali (anni 1954, 1966, 1979, 1988 e 1995) oltre alle Cartografie Tecniche Regionali a scala 1:10.000, prodotte all'incirca negli anni '80 del secolo scorso. L'Autorità di Bacino sta inoltre realizzando una nuova versione della cartografia a scala 1:10.000, coerente con i rilievi topografici di terra e LIDAR condotti negli anni 2004-2005 e con i rilievi aereo-fotogrammetrici e le orto-foto-carte a scala 1:2.000 realizzati contestualmente.

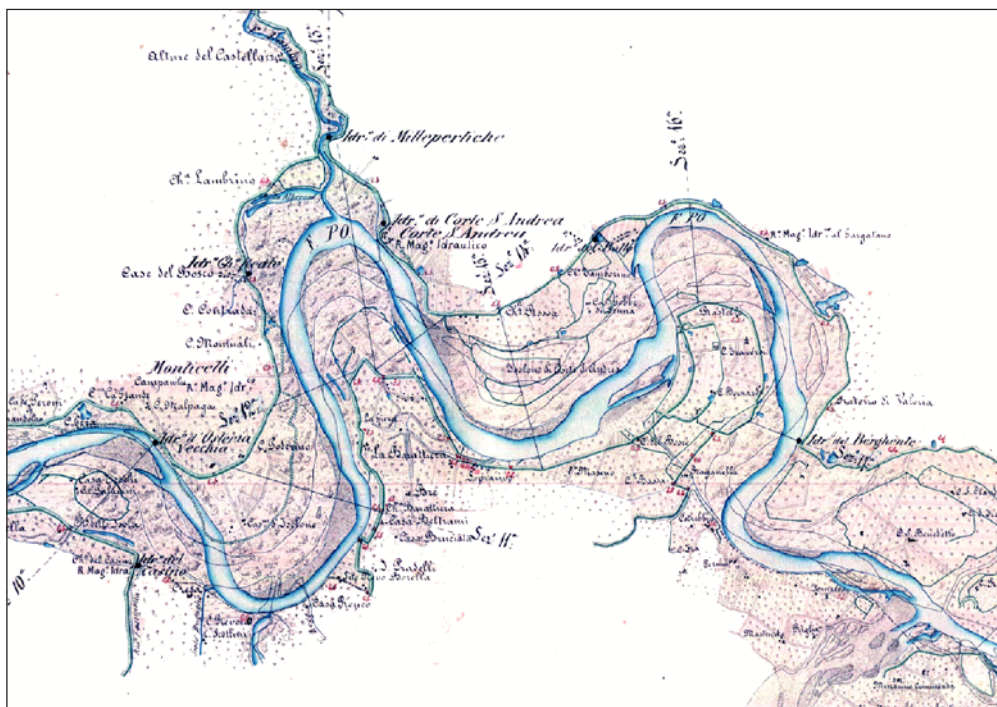


Fig. 6. Stralcio della Cartografia della "Commissione tecnico-scientifica istituita con R° Decreto 16 febbraio 1873 per suggerire i provvedimenti di cui abbisogna il fiume", a scala 1:50.000.

Sono di particolare interesse infine i voli aereo-fotogrammetrici, realizzati a scale e per scopi diversi; anche in questo caso il patrimonio documentale risulta molto vasto, ancorché frammentato. Sono comunque disponibili per la consultazione presso la sede dell'Autorità di bacino e di AIPO numerosi voli a copertura di bacino (GAI del 1954, Volo Italia 1994), voli a copertura di asta fluviale (voli Po 1975, 1992, 1995, 2004-2005) o realizzati per documentare particolari condizioni idrologiche del fiume (Po 2002 magra e Po 2000 piena).

Cartografia delle caratteristiche geomorfologiche dell'alveo e delle aree inondabili del fiume Po

La cartografia, realizzata dallo Studio Geomap di Firenze per conto dell'Autorità di bacino, descrive e aggiorna (rispetto ad una precedente versione realizzata sempre dallo Studio Geomap per NIER/CER nel 1982) le modificazioni morfologiche intervenute nell'alveo del Po e valuta alcuni aspetti relativi alle dinamiche in atto nella regione fluviale quali, in particolare:

- le eventuali interazioni tra alvei fluviali abbandonati e l'attuale sistema difensivo (dalle piene e dalle divagazioni planimetriche del corso d'acqua);
- le caratteristiche dei predetti alvei in funzione della capacità di riconnettersi all'ambiente fluviale e/o di essere sede di deflusso durante le piene, valutate mediante parametri morfologici e topografici ove

possibile;

- l'intensità dei fenomeni erosivi che hanno interessato le sponde;
- le altezze delle scarpate dei terrazzi fluviali, in modo da evidenziare quelli che possono fisicamente limitare l'espansione di eventuali acque di esondazione.

L'ambito di analisi è la fascia C del Po, dalla confluenza del torrente Stura di Lanzo a Pontelagoscuro.

Nel lavoro sono state rilevate le forme morfologiche presenti nell'area di studio, sia naturali che d'origine antropica, alcune delle quali, seppur poco significative nel breve periodo, sono utili per una migliore e più completa caratterizzazione dell'alveo e dell'ambiente fluviale.

Le informazioni e le conseguenti valutazioni sono state ricostruite a partire dall'analisi delle foto storiche e recenti. L'attività è consistita in prima istanza nell'analisi foto-interpretativa della documentazione disponibile.

Il periodo preso in considerazione dall'analisi morfologica è compreso tra il 1979 e il 2002 poiché le modificazioni morfologiche verificatesi tra il 1954 e il 1979 sono state documentate nella precedente cartografia NIER/CER (Fig. 7). È stato inoltre possibile ricostruire lo stato del corso d'acqua nel 2002, analizzando un volo effettuato nei primi mesi di quell'anno, mentre il Po si trovava in una situazione di magra particolarmente intensa.

Le informazioni e le conseguenti valutazioni sono state inserite in formato numerico in una banca dati predisposta per il progetto. Gran parte delle informazioni ottenute è stata originariamente rappresentata in una cartografia tematica in scala 1:10.000 per la porzione di territorio situata all'interno degli argini maestri, e in una serie di sezioni in scala 1:25.000 per quella esterna (Fig. 8).

Caratteristiche dei sedimenti

La difficoltà di simulare la complessa dinamica geomorfologica e sedimentologica del fiume Po mediante modelli concettuali e matematici a "fondo mobile" ha reso necessario ricorrere a metodi supportati da valutazioni sedimentologiche. Queste hanno consentito di interpretare l'evoluzione litologica e granulometrica dei sedimenti lungo la progressiva, funzione dei meccanismi che regolano la produzione, il trasporto e la sedimentazione degli stessi.

Si è proceduto quindi allo studio della costituzione litologica dei sedimenti (mineralogica e litologica dei granuli sabbiosi monomineralici e polimineralici, litologica dei ciottoli ghiaiosi) e granulometrica (curva cumulativa e relativi parametri statistico-sedimentologici, competenza e capacità di trasporto).

Il numero di campioni prelevati (291 lungo i 490 km di asta) e la loro distribuzione spaziale sono stati determinati tenendo conto delle dinamiche attive dell'alveo del fiume Po, del relativo assetto geomorfologico e della presenza di potenziali "fonti" di apporti solidi significativi (affluenti, tratti di sponda in erosione,

presenza di sedimenti in alveo o sulle barre a tessitura diversificata). Allo scopo di ottenere informazioni sulla tipologia dei sedimenti trasportati dai principali affluenti appenninici sono stati eseguiti specifici campionamenti anche nel loro alveo (v. Taro, Parma, Enza).

Il campionamento è stato eseguito lungo stendimenti e/o aree campione (85 sul fiume Po e 6 sugli affluenti), riferite alle sezioni topografiche della rete ufficiale di monitoraggio topografico del fiume Po.

Il campionamento è stato eseguito in modo da rendere ogni litotipo confrontabile, dal punto di vista volumetrico, con gli altri dello stesso litotipo.

È stata adottata una procedura che consentisse di prelevare campioni il più rappresentativi possibile, uti-

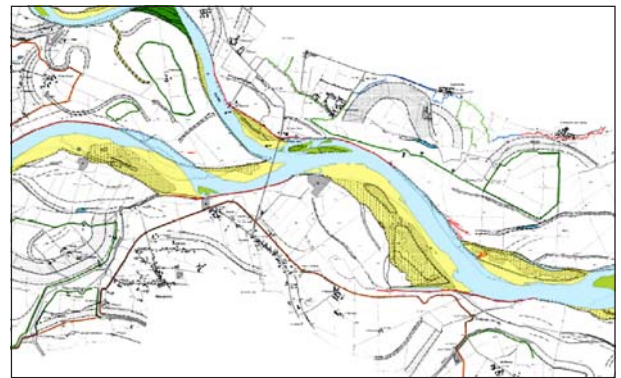


Fig. 8. Stralcio della Cartografia delle caratteristiche geomorfologiche dell'alveo e delle aree inondabili del fiume Po (AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO, 2008).

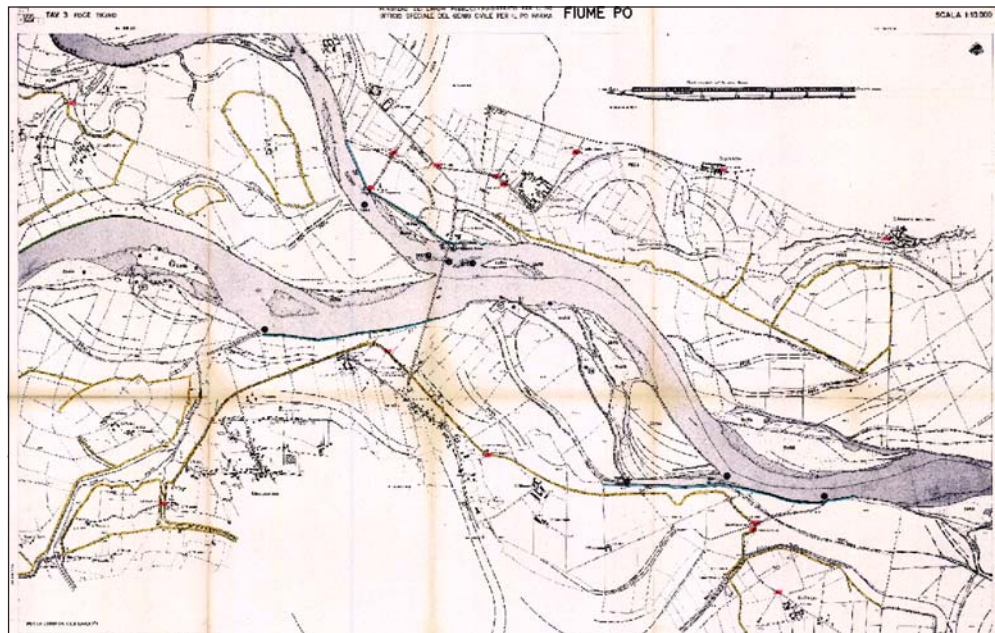


Fig. 7. Cartografia della indagine fotointerpretativa dell'alveo del Fiume Po dalla confluenza del Tanaro a Pontelagoscuro (NIER/CER, 1982).

lizzando diverse metodologie in funzione della granulometria prevalente. Per i campioni prevalentemente ghiaiosi la metodologia di campionamento è stata definita in modo da poter valutare e quantificare l'eventuale cozzamento superficiale.

Le analisi condotte hanno permesso di caratterizzare l'andamento dei *diametri caratteristici* delle barre e dell'alveo (D5, D16, D50 e D84) lungo la progressiva (Fig. 9).

Tali andamenti mettono in evidenza, tra l'altro, una forte discontinuità tessiturale esistente tra i tratti a monte e a valle del Fiume Ticino. La suddetta discontinuità non è necessariamente "sinonimo" di discontinuità sedimentologica. Infatti, l'analisi volumetrica delle forme fluviali ed il relativo bilancio di trasporto solido hanno evidenziato un regolare trasferimento di materiale dal sistema *braided* verso i tratti di valle. Ciò si spiega ammettendo che la reiterata movimentazione delle ghiaie, all'interno del sistema *braided*, produca, attraverso gli urti tra i ciottoli, materiali di dimensioni compatibili con la competenza e la capacità di trasporto dei tratti di valle.

Secondo tale meccanismo, i tratti A e B contribuirebbero sensibilmente alla produzione di sabbie e ghiaietto che andrebbero ad alimentare il trasporto solido nei tratti di valle. Tale ipotesi ha trovato conferme significative nei risultati delle analisi litologiche dei sedimenti, i quali hanno evidenziato una stretta "parentela" tra la composizione dei frammenti litici sabbiosi, del quarzo monominerale (oltre che di alcuni minerali fondamentali delle rocce ignee e metamorfiche) e quella dei ciottoli presenti, in particolare, nei primi due tratti.

Altro elemento significativo è la convergenza, verso valle, dei diametri caratteristici. Considerando solo il tratto terminale "I", fra Pontelagoscuro e il Po di Goro, la differenza tra il D84 e il D5 si riduce mediamente a 0,2 mm.

Il *trend compositivo* dei sedimenti lungo la progressiva, in relazione alla dinamica di produzione, trasporto e deposito dei sedimenti, è stato descritto sulla base delle caratteristiche dei costituenti presenti in ciascun tratto che sono: ciottoli e relativa matrice sabbiosa e sabbie di deposito. Gli elementi costitutivi delle sabbie, utili per la comprensione dei rapporti esistenti tra sabbie e ghiaie, sono frammenti litici (totali, metamorfici, sedimentari), quarzo totale e monominerale. Infatti, tale trend tessiturale ha evidenziato la presenza di importanti discontinuità lungo la progressiva. Il trasferimento del materiale in tratti contigui presuppone la riduzione della dimensione dei ciottoli, fino a ottenere materiali compatibili con le condizioni idrauliche del mezzo di trasporto nel tratto di valle. Tale ipotesi presuppone che debbano sussistere univoche affinità composizionali tra ciottoli, frammenti litici, quarzo litico e polimineralico. Infatti, il quarzo rappresenta il minerale fondamentale delle rocce ignee e metamorfiche (ad affinità prevalentemente alpina) e costituisce l'elemento più stabile, poiché più resistente sia ai fenomeni di usura meccanica che di alterazione chimica.

Immaginando, ad esempio, la sequenza evolutiva di un ciottolo a costituzione cristallina o ignea, dovuta agli urti reiterati, che si possono manifestare durante il suo trasporto e la sua mobilitazione all'interno del

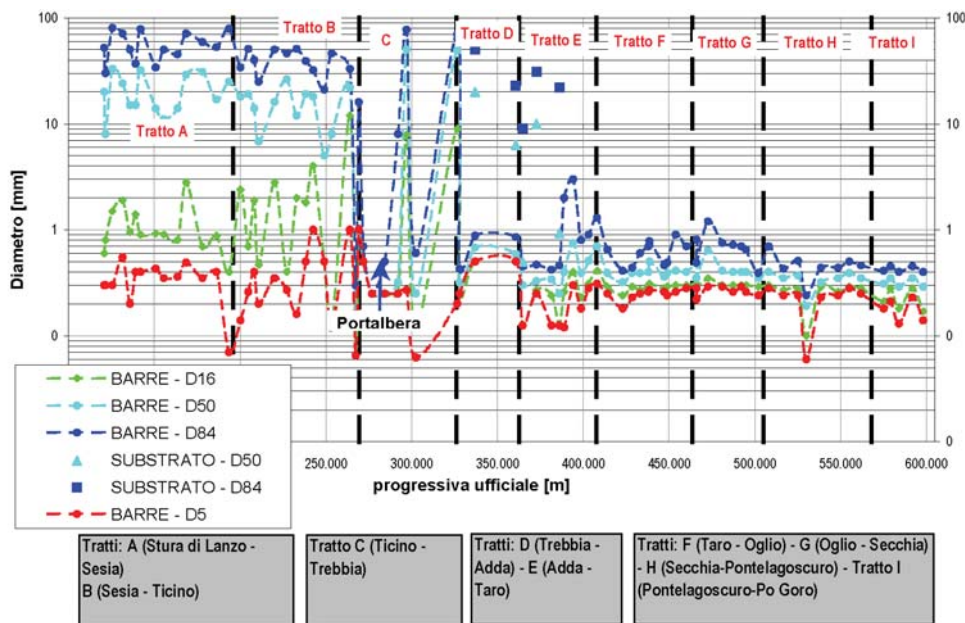


Fig. 9. Diametri caratteristici delle barre.

sistema *braided*, si può ipotizzare che il ciottolo perda progressivamente i costituenti minerali più deboli (miche, feldspati, femici), ereditando una composizione sempre più quarzifica. I frammenti litici nelle sabbie dovrebbero avere delle affinità composizionali con le ghiaie da cui sono stati prodotti. La quarzite dovrebbe inoltre rappresentare un termine evoluto degli originari ciottoli magmatici e soprattutto metamorfici.

La riduzione progressiva del volume del ciottolo quarzifico produrrebbe granuli di sabbia quarzosi, polie e monomineralici. Verso il delta, i granuli quarzosi monomineralici dovrebbero presentare un trend positivo (crescente).

Il trend evolutivo-composizionale sopra delineato ha avuto conferme molto significative dai risultati delle analisi composizionali. Il trend composizionale dei sedimenti lungo la progressiva può essere esaminato, in modo sintetico, attraverso l'analisi delle variazioni composizionali dei ciottoli e mediante l'analisi della frazione sabbiosa presente sia come deposito che come matrice (di depositi sabbioso-ghiaiosi). In particolare, ai fini della comprensione dei meccanismi di trasporto, in funzione del diverso regime idraulico lungo la progressiva, appare estremamente significativo seguire l'evoluzione quali-quantitativa dei frammenti litici (sia metamorfici, di origine alpina, che sedimentari, di origine appenninica), presenti nel campo dimensionale delle sabbie e confrontarli con il trend composizionale dei ciottoli. Il confronto tra il trend dei frammenti litici con quello dei ciottoli evidenzia e conferma le considerazioni di seguito riportate.

- Gli apporti sabbiosi a valle del sistema *braided* derivano in buona parte dalla disgregazione di ciottoli di dimensioni tali da non poter essere trasportati a valle, se non dopo avere raggiunto dimensioni compatibili con il regime idraulico planiziale (tipico dei tratti a valle del sistema *braided*).
- La riduzione dimensionale dei ciottoli sarebbe, quindi, una delle fonti principali di alimentazione di granuli sabbiosi, sia litici che monominerali. La diminuzione dei frammenti litici metamorfici da monte verso valle appare pertanto dovuta sia alla progressiva disaggregazione dei componenti monominerali (a scapito della concentrazione di frammenti litici), sia all'incremento relativo della frazione litica di natura sedimentaria ad opera dei principali affluenti appenninici (sostanzialmente Tidone, Trebbia, Taro e Parma).
- La percentuale di litici metamorfici, presenti alla progressiva di Pontelagoscuro, è tuttavia ancora relativamente elevata (40% - 45%) e confrontabile con la percentuale di litici sedimentari, di pertinenza appenninica. Tale circostanza è peraltro in ottima correlazione con il trend di variazione delle rocce

metamorfiche e magmatiche lungo la progressiva. Considerato che a valle della confluenza del Tanaro gli apporti ghiaiosi alpini ad opera degli affluenti sono del tutto trascurabili, tale dato conferma un sostanziale e costante apporto di litici e granuli monominerali direttamente dal sistema *braided*, in cui tendono a stazionare i depositi ghiaiosi provenienti dal tratto iniziale (ad affinità alpina). Inoltre, considerato che la composizione delle sponde mostra una affinità prevalentemente alpina, anche i fenomeni di erosione spondale concorrono nel produrre litici e costituenti monominerali di tipo sialico.

Quanto sopra descritto trova conferma anche nelle variazioni lungo la progressiva del quarzo sabbioso totale, dato dalla somma dei granuli quarzosi litici e monomineralici. Infatti, considerato che gli apporti appenninici sono rappresentati sostanzialmente da rocce sedimentarie, sia nei termini ghiaiosi che sabbiosi (come confermato dai campionamenti eseguiti sulle barre di confluenza e a monte delle confluenze, negli alvei torrentizi), l'arricchimento relativo della frazione quarzosa non può che essere dovuto alla progressiva disgregazione dei litici metamorfici e ignei di provenienza alpina.

Le analisi granulometriche hanno consentito infine di definire il limite dimensionale tra il materiale che subisce trasporto sul fondo (per fenomeni trattivi e per saltazione) e quello che subisce trasporto in sospensione. La conoscenza di tale limite è di fondamentale importanza poiché i risultati delle osservazioni sperimentali suggeriscono che i depositi che compongono le forme fluviali sono costituiti anche da materiali fini che verosimilmente vengono veicolati in sospensione, specialmente nelle fasi parossistiche di un evento di piena, per poi essere abbandonati insieme al trasporto di fondo durante le fasi calanti delle piene stesse. Le analisi condotte su molteplici campioni hanno permesso di determinare che il limite tra il sedimento trasportato in sospensione e quello trasportato sul fondo per saltazione è pari a 0,25 mm, lungo tutta l'asta fluviale oggetto di studio. Tale risultato è in accordo con il valore di 0,35 mm riportato in letteratura (CATI, 1981).

Nella Fig. 10 sono riportate le curve di regressione dei diametri caratteristici (D5, D16, D50 e D84) dei sedimenti costituenti le barre che sono stati campionati nel tratto compreso tra confluenza Arda e Pontelagoscuro, segmento fluviale particolarmente significativo per la comprensione dei rapporti tra carico di fondo e carico sospeso, per la presenza di materiali essenzialmente sabbiosi. Si osserva come la convergenza del D84 e del D50 con il D5 e il D16 verso il delta sia da attribuire alla progressiva perdita di energia verso la foce del Po, dovuta anche all'azione di rigurgito dipen-

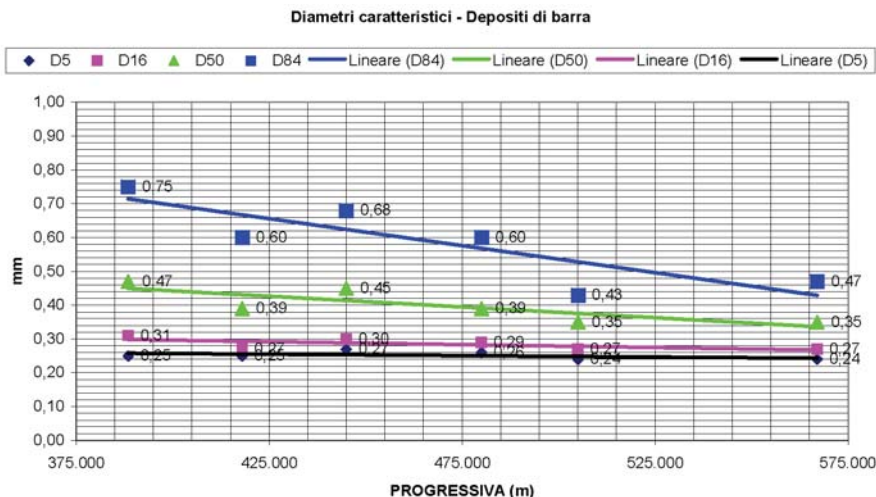


Fig. 10. Diametri caratteristici dei sedimenti delle barre e relative curve di regressione tra confluenza Arda e Pontelagoscuro.

dente dal livello del mare. Questo comporta che il materiale trasportato sul fondo sia progressivamente selezionato verso la dimensione corrispondente al carico sospeso.

L'assenza di selezione del D5 e del D16 lungo la progressiva, nonostante si verifichi indubbiamente una perdita di materiale lungo il tragitto (poiché in caso contrario tale frazione granulometrica non la si potrebbe trovare nei depositi di fondo) è verosimilmente imputabile al costante apporto di materiale con diametro inferiore a circa 0,25 mm.

Sulla base di queste osservazioni è stato possibile quantificare gli apporti al fondo dovuti alla sedimentazione di materiale che in determinate fasi della piena viene veicolato in sospensione, al fine di quantificare uno degli elementi di bilancio del trasporto solido. Considerato infatti che il limite granulometrico tra carico sospeso e carico di fondo risulta relativamente costante lungo l'asta del Po, tra Stura di Lanzo e Po di Goro, una stima degli apporti al fondo direttamente dal carico sospeso può essere eseguita sulla base della percentuale corrispondente al passante al diametro 0,25 mm.

I tratti di asta in cui è rilevante la presenza all'interno delle barre dei materiali provenienti da carico sospeso sono:

- tra la fine del sistema *braided* (località Pancarana, a monte della confluenza con il Ticino) e fino a monte della foce Trebbia, in relazione alla repentina variazione del regime idraulico e alla sensibile diminuzione della pendenza, associata alla presenza della soglia di Portalbera che regola la quota di fondo;
- all'interno del tratto navigabile, tra foce Adda e Borgoforte, a causa della dinamica indotta dalle opere di navigazione e dalla conseguente apprezzabile altezza delle forme fluviali;

- nel tratto più a valle, tra Pontelagoscuro e il Po di Goro, a causa dell'azione di rigurgito del mare, che induce un rallentamento della corrente, favorendo il deposito di particelle molto fini.

Per contro, l'apporto solido da carico sospeso è trascurabile nel tratto iniziale, caratterizzato da un regime idraulico impulsivo, fluvio-torrentizio e tra foce Trebbia e foce Adda, a causa delle dinamiche impulsive associate al funzionamento dell'impianto idroelettrico di Isola Serafini.

Processi del funzionamento

Le tendenze evolutive dei processi in atto nell'alveo inciso del fiume Po sono state suddivise in due categorie, una relativa alle modificazioni delle forme fluviali emerse (sponde, barre e isole) e l'altra relativa all'evoluzione del fondo alveo. Tali processi, che sono tra loro correlati, sono stati analizzati separatamente, in quanto risultano differenti le metodologie utilizzate per il loro studio.

Modificazioni delle forme fluviali emerse

L'analisi geomorfologica delle modificazioni delle forme fluviali emerse è stata condotta con riferimento all'intervallo di tempo compreso tra il 1982 e il 2005 che è significativo poiché si sono verificati tre eventi di piena straordinaria negli anni 1994, 2000 e 2002 (quest'ultima solo per il tratto a valle della confluenza dell'Adda), seguiti ad un periodo relativamente esteso (1982-1993) di "quiescenza", in cui l'attività del corso d'acqua è stata determinata essenzialmente da condizioni di regime ordinario.

La piena del 2002 è molto significativa in quanto fu determinata soprattutto dai bacini prealpini situati ad est del Lago Maggiore. Ne consegue che, a differenza delle piene del 1994 e del 2000, alimentate essenzial-

mente dai bacini piemontesi, la piena del 2002 interessò il segmento fluviale situato a valle della confluenza dell'Adda e fu verosimilmente contraddistinta da scarsi apporti solidi dai bacini piemontesi situati a monte del Ponte della Becca.

L'analisi geomorfologica delle forme fluviali emerse è stata svolta utilizzando le cartografie geomorfologiche dell'alveo del fiume Po del 1982 e del 2002, descritte ai paragrafi precedenti, il DTM del rilievo LIDAR, le ortofoto del 2004/2005, le cartografie aereo-fotogrammetriche delle serie storiche e foto aeree realizzate in diversi anni dal 1982 al 2005. La metodologia è basata sul confronto tra la condizione geomorfologica del 1982 e quella del 2002 e al successivo confronto con la condizione al 2005. Sulla base dei confronti sono state definite le modificazioni planimetriche delle forme di erosione e di deposito presenti nell'alveo inciso del fiume Po verificatesi nei periodi esaminati. A partire da tale confronto sono state poi condotte ulteriori analisi volte a definire la caratterizzazione dell'impronta dovuta all'attività ordinaria rispetto a quella straordinaria del corso d'acqua e della morfodinamica che caratterizza le diverse fasi di una piena (fase ascendente, colmo, fase discendente); la tendenza evolutiva delle forme di deposito (stabile o tendente alla stabilizzazione, instabile con tendenza alla rimobilizzazione e trasporto in regime ordinario e straordinario, instabile e soggetto alla rimobilizzazione e trasporto solo in particolari regimi idraulici -fase crescente della piena- ma con tendenza al deposito durante la fase discendente della piena stessa); la quantificazione volumetrica delle modificazioni delle forme di erosione e di deposito.

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. La disponibilità di dati topografici di precisione e di dettaglio data dalla tecnologia LIDAR consentirà in futuro di agevolare la misura e di rendere più affidabile la metodologia di stima delle modificazioni volumetriche. Nella Fig. 11 vengono riportate le curve di bilancio erosione-deposito, relative alla dinamica morfologica e sedimentologica delle forme fluviali emerse tra la confluenza della Stura di Lanzo e l'incile del Po di Goro, dal 1982 al 2005. Le analisi condotte mettono in evidenza che il tratto compreso tra la foce della Stura di Lanzo e foce Ticino è in condizione di erosione (tratti A e B). A valle, fino a foce Trebbia, si ha una condizione di lieve deposito (tratto C). Tra foce Trebbia e foce Adda si ha una condizione di equilibrio (erosioni = depositi - tratto D). Il tratto navigabile, a partire da foce Adda fino a valle di foce Oglio, è caratterizzato da condizioni di forte e consistente deposito in corrispondenza dei rami laterali a tergo dei pennelli (tratti E ed F). Il tronco a valle, fino a foce Panaro risulta essere in erosione (tratti G ed H). tra foce Panaro e il Po di Goro si hanno condizioni di deposito (tratto I).

Modificazioni del fondo alveo

Per determinare le linee evolutive che hanno caratterizzato l'evoluzione del fondo alveo lungo il corso del fiume Po è stata applicata una metodologia basata sul

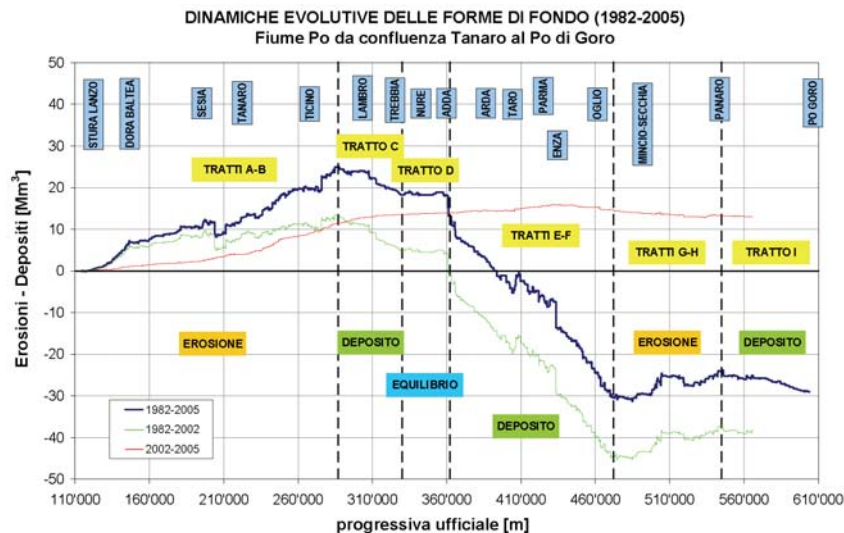


Fig. 11. Bilancio delle dinamiche evolutive delle forme fluviali emerse.

confronto multitemporale tra i profili di pelo libero di magra, ottenuti a partire dalle sezioni topografiche storiche disponibili (si vedano i paragrafi precedenti) e attraverso l'implementazione di un modello di calcolo idrodinamico a fondo fisso. Questi profili forniscono l'andamento del pelo libero che si forma in funzione della morfologia media del fondo dell'alveo e pertanto conducono ad una rappresentazione idraulica abbastanza rappresentativa dell'assetto del fondo alveo medio e delle sue variazioni nel tempo.

Per il tratto tra foce Stura di Lanzo e foce Tanaro, le tendenze evolutive del fondo alveo, valutate per il periodo 1999-2004, possono essere così riassunte:

- dalla confluenza con lo Stura di Lanzo fino a Palazzolo Vercellese (km 160) si ha un'alternanza di tratti in erosione e tratti in deposito, con valori assoluti ovunque inferiori a 1-1,5 m;
- nel tratto tra Palazzolo Vercellese e Casale Monferrato (km 180) si è verificato un abbassamento generalizzato del fondo alveo, variabile tra 0 e 1,5 m;
- a valle di Casale Monferrato, fino a monte di Frassineto (km 190) si ha un tratto sostanzialmente in equilibrio;
- da Frassineto fino alla confluenza con il Tanaro si è verificato un abbassamento generalizzato delle quote di fondo medio dell'alveo, con valori massimi di circa 1,5-2 m, ad eccezione di un tratto limitato tra il ponte di Valenza e la confluenza del T. Grana (4 km circa), dove si è verificato un innalzamento medio delle quote di fondo dell'ordine di 2 m.

Per il tratto tra foce Tanaro e l'incile del delta, le tendenze evolutive del fondo alveo sono state valutate a partire dal 1954. Dall'analisi dei diversi profili di fondo medio si osserva principalmente un generale abbassamento dell'alveo dal 1954 in poi, per quasi l'intero tratto in studio, con dinamiche molto più accentuate nel tratto compreso tra foce Nure e foce Oglio. Solo a valle di Pontelagoscuro (km 565) il profilo di fondo medio dell'alveo del 2005 è sostanzialmente simile a quello del 1954 (prima fase di erosione dal 1954 al 1979 e successiva fase di deposito dal 1979 al 2005).

Sono state infine condotte analisi di maggior dettaglio, riferite al confronto dei profili di fondo medio considerando solamente i rilievi del 1979, del 1999 e del 2005. Tali rilievi permettono di valutare le variazioni delle dinamiche dell'alveo in periodi temporalmente omogenei a quelli considerati nelle analisi delle tendenze evolutive delle forme di fondo (1982, 2002 e 2005). Dall'analisi dei profili si osserva che nel periodo 1979-1999 tra Tanaro e Trebbia il fondo alveo era abbastanza stabile, mentre tra il 1999 e il 2005 si è verificato un generale abbassamento. Tra Trebbia e Isola Serafini (a monte foce Adda) tra il 1979 e il 1999 si è verificato un

innalzamento delle quote medie di fondo dell'alveo; tra il 1999 e il 2005 tale tendenza si è invertita, seppur di poco. Nel tratto a valle di Isola Serafini, fino a monte di foce Parma, il fondo medio dell'alveo ha subito durante l'intero periodo 1979-2005 un progressivo abbassamento. Tra foce Parma e foce Oglio si è verificato un innalzamento delle quote di fondo tra il 1979 e il 1999; successivamente si è verificata una sostanziale stabilità. Tale fenomeno può essere correlato al fatto che il materiale al fondo proveniente dagli affluenti appenninici, caratterizzato da una granulometria superiore a quella del Po, non può essere movimentato dal Po in condizioni ordinarie, ma solo durante il ramo ascendente delle piene. Tra foce Oglio e Bergantino (km 520), in provincia di Mantova si è verificato nell'intero periodo 1979-2005 un abbassamento delle quote di fondo medio. Tra Bergantino e Pontelagoscuro (km 565), il fondo medio dell'alveo si è mantenuto sostanzialmente stabile nell'intero intervallo di riferimento 1979-2005. Nel tratto a valle di Pontelagoscuro il fondo alveo ha subito un costante innalzamento nell'intero periodo 1979-2005, correlato sia alla progressiva perdita di energia verso la foce del Po, dovuta all'azione di rigurgito ad opera del mare, sia all'apporto solido da monte che, in occasione delle piene degli anni 1994, 2000 e 2002, è stato notevole.

Merita un cenno particolare il comportamento dei sedimenti in corrispondenza di Isola Serafini: tale tratto è caratterizzato da condizioni di deposito tra foce Trebbia e Isola Serafini e da condizioni di erosione tra Isola Serafini e foce Parma. Lo sbarramento e l'esercizio della centrale idroelettrica determinano un rallentamento della corrente a monte e quindi condizioni medie che favoriscono il deposito sul fondo, mentre a valle dello sbarramento il deficit di continuità longitudinale (indotto dallo sbarramento) e laterale (indotto dalle opere per la navigazione) favorisce l'erosione del fondo alveo. L'insieme di queste azioni ha comportato, nel primo tratto a valle dello sbarramento, l'asportazione del substrato grossolano corazzato che risulta sospeso di qualche metro rispetto al fondo alveo; l'erosione del fondo alveo sta interessando pertanto i depositi prevalentemente sabbiosi e relativamente più antichi.

Dopo aver valutato le variazioni del fondo medio sono stati stimati i corrispondenti volumi erosi e depositati sul fondo alveo, mediante i calcoli di seguito descritti.

È stata determinata la superficie dell'alveo di magra compreso tra due sezioni, utilizzando sia la carta geomorfologica del 1982 che quella del 2002, sia il rilievo LIDAR e le ortofoto del 2004/2005: tali superfici sono individuate nell'ambito dell'alveo inciso al netto di tutte le forme emerse censite nell'analisi geomorfologica.

È stata calcolata la superficie media (1982-2002 e

2002-2005) tra quelle precedentemente misurate.

È stato quindi calcolato il prodotto di tale superficie per la media della variazione di quota del fondo alveo relativa a ciascuna delle due sezioni estreme (1979-1999 e 1999-2004/2005).

La somma algebrica dei volumi così ottenuti equivale ai volumi complessivamente movimentati nel fondo alveo.

I risultati così ottenuti sono rappresentati per il tratto tra Stura di Lanzo e Tanaro (Fig. 12) e per il tratto tra Tanaro e Po di Goro (Fig. 13).

Valutazione delle tendenze evolutive del fondo alveo attraverso l'analisi dei livelli di magra del fiume Po

La determinazione delle tendenze evolutive in atto nel fondo alveo è stata condotta anche attraverso l'analisi delle altezze idrometriche minime annue registrate. Secondo quanto indicato da CATI (1981) "le

altezze idrometriche minime si possono poi, per consenso unanime, assumere come rappresentative, nel loro andamento generale, degli eventuali sensibili spostamenti di fondo. Questo concetto è stato assunto a base delle determinazioni che sono servite per quantificare il fenomeno dell'abbassamento del Po".

In generale, si ritiene che le variazioni di livello in periodi tra loro molto ravvicinati (qualche anno) siano verosimilmente correlate alle differenze tra le portate di magra, mentre le variazioni di livello in periodi prolungati (decine di anni) sono correlate ad una variazione della morfologia dell'alveo di magra.

Dall'analisi delle letture idrometriche delle magre annuali (letture autunno-inverno e primavera-estate), raccolte e fornite da Govi (com. pers.), riferite alle stazioni di Becca (dal 1851 al 2006), Piacenza (dal 1869 al 2006), Cremona (dal 1868 al 2006- Fig. 14), Casalmaggiore (dal 1850 al 2006), Boretto (dal 1868 al

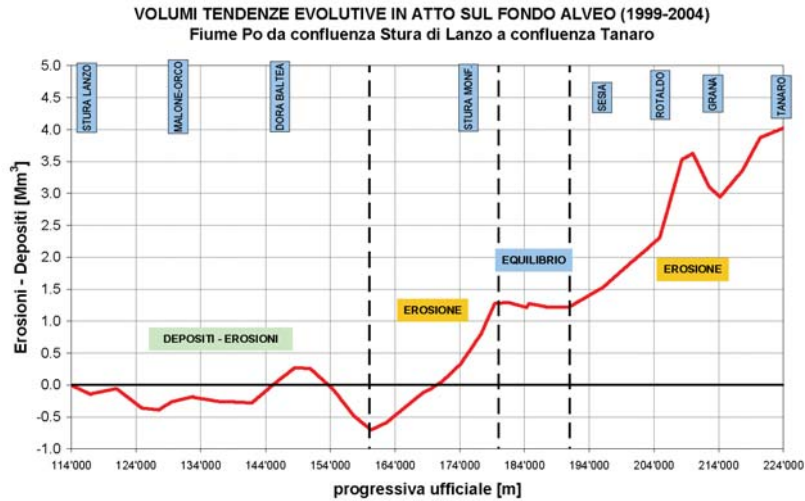


Fig. 12. Volume eroso e depositato lungo il fondo alveo (Stura Lanzo – Tanaro).

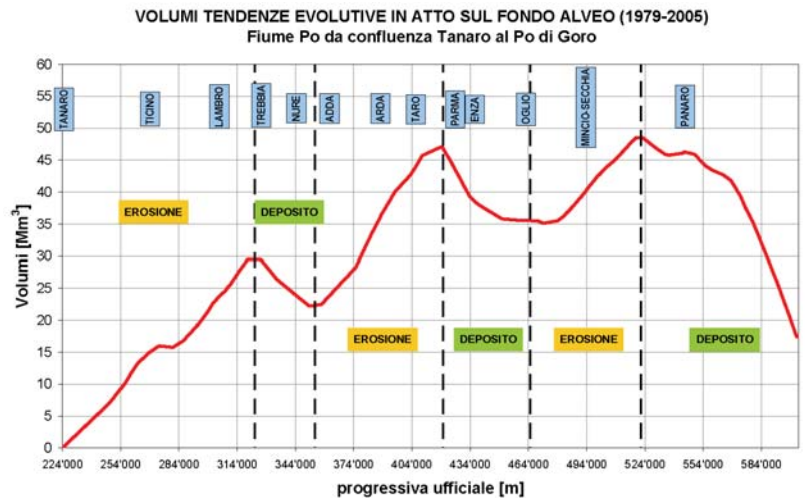


Fig. 13. Volume eroso e depositato lungo il fondo alveo (Tanaro – Po di Goro).

2006) e Pontelagoscuro (dal 1807 al 2006), si è osservata una sostanziale invariabilità dei livelli di magra fino all'incirca al 1960, dopodiché i livelli si sono ridotti notevolmente fino al 1990. Dopo il 1990 il fenomeno di abbassamento dei livelli di magra si è generalmente attenuato, fatta eccezione per i livelli relativi alle magre estive degli anni 2003, 2005 e 2006, i quali sono però correlati ad eventi di magra eccezionali e non ad abbassamenti delle quote di fondo alveo.

Il fenomeno di abbassamento dei livelli tra il 1960 e il 1990 testimonia l'abbassamento generalizzato del fondo alveo del Po che si è verificato in tale periodo. Tale fenomeno è legato all'influenza delle opere realizzate a partire dagli anni '50 del secolo scorso, come la centrale di Isola Serafini, il completamento delle opere di navigazione nel tratto tra Cremona e foce Mincio. Tale periodo è stato inoltre caratterizzato dall'estrazione di notevoli quantità di inerti dall'alveo inciso.

Bilancio dei sedimenti

Il bilancio del trasporto solido del corso d'acqua è stato condotto secondo lo schema riportato nella Fig. 15, utilizzando i dati derivanti dalle analisi descritte nei paragrafi precedenti, i dati degli apporti degli affluenti e dei volumi estratti in concessione.

In particolare 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:

$$G_i = G_{i-1} + Af - Estr + \Sigma Ebar - \Sigma Dbar + \Sigma Esp - \Sigma Dsp + \Sigma Efondo - \Sigma Dfondo$$

in cui:

G_i, 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;

$Estr$ = portata solida media estratta dal tratto considerato;

$\Sigma Ebar$ = sommatoria delle portate medie rese disponibili dalle erosioni di barra e delle isole del tratto considerato;

$\Sigma Dbar$ = sommatoria delle portate medie arrestate nei depositi di barra e delle isole del tratto considerato;

ΣEsp = sommatoria delle portate medie rese disponibili dalle erosioni di sponda del tratto considerato;

ΣDsp = sommatoria delle portate medie arrestate nei depositi di sponda del tratto considerato;

$\Sigma Efondo$ = sommatoria delle portate medie rese disponibili dalle erosioni di fondo alveo del tratto considerato;

$\Sigma Dfondo$ = sommatoria delle portate medie arrestate nei depositi di fondo alveo del tratto considerato.

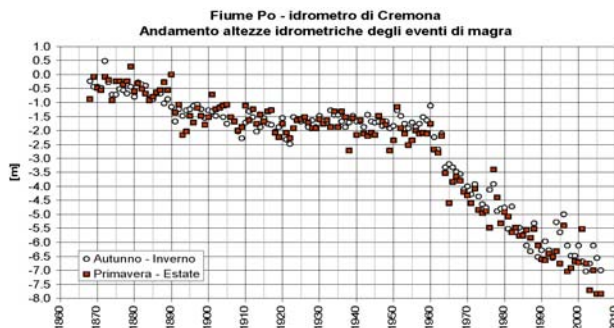


Fig. 14. Livelli di magra presso l'idrometro di Cremona.



Fig. 15. Schema del modello di analisi del bilancio del trasporto solido.

Il bilancio del trasporto solido del fiume Po per il periodo 1982-2005 è riportato nella Fig. 16.

Tra la confluenza con lo Stura di Lanzo e la foce Trebbia (212 km, pari al 43% del tratto in studio; tratti A, B, C), la portata solida al fondo è in costante aumento (da 0,1 a 4,5 $Mm^3 yr^{-1}$ pari a circa 21.000 $m^3 km^{-1} yr^{-1}$) per effetto delle dinamiche interne al sistema (erosioni > depositi), degli apporti esterni degli affluenti e dal ridotto impatto antropico sulle dinamiche evolutive dell'alveo inciso. Tali dinamiche risultano essere sostanzialmente compatibili con l'attuale sistema fluviale.

Da confluenza Trebbia a Borgoforte, poco a valle di foce Oglio (148 km, pari al 30% del tratto in studio; tratti D, E, F) la portata solida al fondo subisce una riduzione (da 4,5 a 4,0 $Mm^3 yr^{-1}$) che mette in evidenza come i depositi in atto siano superiori rispetto ai processi erosivi e agli apporti degli affluenti (Adda e corsi d'acqua appenninici). Tale circostanza è associata al consistente impatto antropico sul sistema fluviale, rappresentato in prevalenza dalla centrale di Isola Serafini e dalle opere di navigazione, presenti tra Cremona e foce Oglio, che sono in grado di interferire e condizionare le dinamiche evolutive all'interno dell'alveo inciso. La riduzione del trasporto solido verso valle, conseguente ai fenomeni deposizionali citati, ha indotto importanti fenomeni erosivi a carico del fondo alveo: la

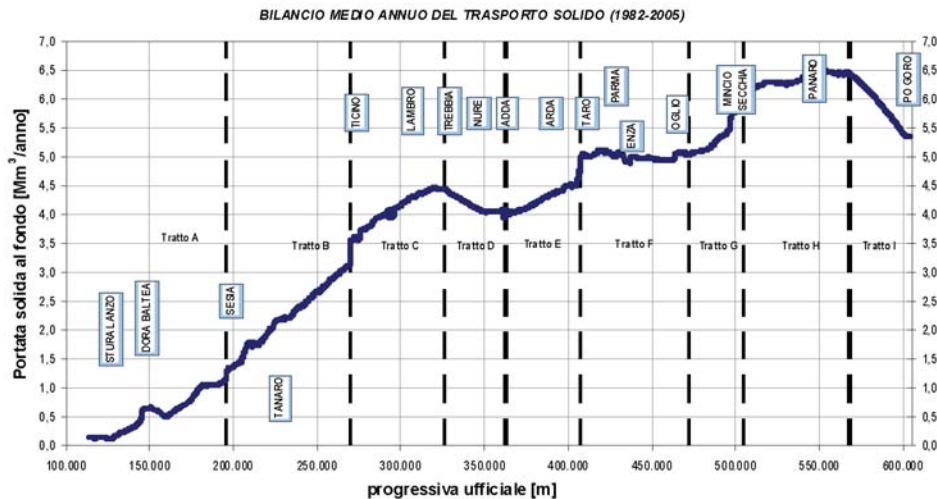


Fig. 16. Bilancio medio annuo del trasporto solido al fondo del fiume Po nel periodo 1982-2005.

corrente fluviale povera di sedimento si carica di materiale prelevandolo dal fondo, unica parte della sezione fluviale mobilizzabile;

Da Borgoforte fino a Pontelagoscuro (91 km, pari al 19% del tratto in studio; tratti G, H), l'impatto antropico sulle dinamiche evolutive in atto nell'alveo inciso si riduce notevolmente (presenza di pennelli di navigazione e di opere di difesa meno diffuse, pari a circa la metà rispetto al tratto precedente). Ne consegue che le dinamiche evolutive in atto assumono nuovamente un carattere più naturale. Si evidenzia un incremento della portata solida verso valle (più accentuato tra Borgoforte e Ostiglia) dello stesso ordine di grandezza di quello del tratto a monte di foce Trebbia: complessivamente si passa all'incirca da 4,0 a 5,0 $Mm^3 yr^{-1}$, circa 11.000 $m^3 km^{-1} yr^{-1}$.

Il tratto terminale, tra Pontelagoscuro e il Po di Goro (39 km, pari all'8% del tratto in studio; tratto I) risulta caratterizzato, come esposto in precedenza, da notevoli depositi in atto sul fondo alveo, correlati all'apporto solido associato ai tre eventi di piena straordinari (1994, 2000 e 2002) che transita lentamente all'interno del tratto, a causa della progressiva perdita di energia verso la foce dovuta all'azione di rigurgito del mare.

Ricadute sulle attività di pianificazione e gestione del fiume Po

Le attività di studio descritte nei capitoli precedenti hanno consentito di disporre di una dettagliata, estesa ed aggiornata conoscenza del corso d'acqua ed in particolare di tutti quei processi (riduzione della larghezza dell'alveo, abbassamento delle quote di fondo e squilibri nel bilancio del trasporto solido) che costituiscono una delle principali fonti di criticità per il raggiungimento degli standard di sicurezza e di qualità

ambientale previsti dalla pianificazione di bacino vigente e dalle Direttive europee (2006/60/CE e 2007/60/CE). Le principali criticità così individuate sono:

- scalzamento e forti sollecitazioni in corrispondenza delle opere di difesa di arginature maestre in frodo, con conseguente rischio di rottura arginale;
- scalzamento delle fondazioni dei ponti con forti problematiche di stabilità dei manufatti, elevati costi di adeguamento e chiusura in via precauzionale durante gli eventi di piena di numerose ed importanti vie di comunicazione;
- difficoltà a derivare di numerose opere di presa (per derivazioni irrigue, per raffreddamento di centrali termoelettriche o per approvvigionamento idropotabile) a seguito dell'abbassamento dei livelli idrici di magra a parità di portata;
- rifacimento ripetuto di alcune conche di navigazione fra cui in particolare quella del porto di Cremona;
- perdita, per progressivo interrimento, di rami laterali, lanche ed in generale di spazi fluviali naturali che vengono occupati da attività agricole, presenti ormai per numerosi tratti fino al ciglio della sponda;
- generalizzata semplificazione e staticità dell'assetto morfologico e dei suoi processi evolutivi alla cui dinamicità spazio-temporale è strettamente connessa la biodiversità dell'ambiente fluviale;
- abbassamento della falda e perdita di zone umide con depauperamento degli habitat acquatici;
- erosione della costa adriatica per mancato apporto solido del fiume Po.

Sulla scorta di tali conoscenze, il *Programma generale di gestione dei sedimenti* ha definito gli obiettivi e gli interventi da attuare per consentire il recupero di condizioni di equilibrio dinamico dell'alveo del Po e la mitigazione delle situazioni di criticità presenti:

- preservare i processi naturali laddove essi sono

- ancora presenti ed attivi;
- ridurre gli effetti ed i condizionamenti al sistema naturale generati dalle opere in alveo per riavviare il fiume a forme meno vincolate e di maggior equilibrio dinamico e valore ecologico;
- migliorare le condizioni di sicurezza idraulica diminuendo il più possibile le sollecitazioni idrodinamiche in corrispondenza delle arginature e garantendo gli usi in atto (prese di derivazione, porti, attracchi, navigazione).

Per conseguire tali obiettivi il *Programma* individua le seguenti linee di azione strategica:

- salvaguardia di tutte le forme e processi fluviali e monitoraggio di sorveglianza ed operativo;
- ripristino dei processi di erosione, trasporto solido e deposizione dei sedimenti attraverso la dismissione o l'adeguamento delle opere in alveo non più efficaci;
- ripristino delle forme attraverso la riapertura e la rifunzionalizzazione di rami laterali.

Gli interventi sono distinti in straordinari ed ordinari. Gli interventi straordinari, generalmente strutturali, devono essere considerati lo *start-up* del *Programma*, in quanto servono a rimuovere le cause esterne più condizionanti e a mettere il fiume in condizione di avviare rapidamente un processo di recupero che possa poi evolvere naturalmente, senza ulteriori interventi se non di tipo correttivo. Gli interventi strutturali proposti sono raggruppati nelle seguenti tipologie:

- dismissione di difese spondali (circa 21 km) che interferiscono e non sono più funzionali agli obiettivi di progetto;
- realizzazione di nuove opere per la difesa dei froldi arginali (circa 24 km) fortemente sollecitati anche in relazione all'abbassamento del fondo alveo;
- realizzazione di opere flessibili – pennelli (circa 7 km) per l'indirizzamento della corrente nel rispetto dei processi evolutivi del fiume;
- adeguamento delle opere di regolazione dell'alveo navigabile – abbassamento delle quote di sommità dei pennelli (circa 37 km);
- riapertura di 29 rami laterali per una lunghezza complessiva di circa 73 km in modo da riconnettere forme relitte o in via di completa disattivazione alle dinamiche morfologiche dell'alveo del Po;
- correzione del tracciato di alcuni meandri la cui evoluzione naturale è stata influenzata dalla presenza di opere e che, nello stato attuale, induce condizioni di rischio sulle arginature.

Fra gli interventi di carattere non strutturale assume particolare rilevanza l'individuazione delle opere di difesa non strategiche da non mantenere e da monitorare per verificarne la progressiva dismissione nel tempo. Lungo i circa 490 km di asta fluviale da Torino all'incile del Delta sono presenti complessivamente 500 km di

difese spondali strategiche per la salvaguardia di centri abitati e arginature e 105 km di difese spondali non strategiche (fra cui in particolare 21 km, come sopra specificato, sono da dismettere con interventi strutturali in quanto interferenti).

Esempio di intervento programmato nel tratto superiore del corso del fiume Po

Nel tratto superiore il fiume Po presenta complessivamente buone condizioni potenziali di naturalità. L'alveo ha, o aveva fino a non troppo tempo fa, un assetto pluricursale caratterizzato da una buona diversità ambientale. I condizionamenti imposti dall'uomo per esigenze di sicurezza idraulica sono limitati agli argini principali, che nel tratto in oggetto non sono ancora continui su entrambe le sponde e che sottendono una regione fluviale (fascia B) abbastanza ampia, non pregiudicando pertanto un adeguato miglioramento dell'assetto morfologico e ambientale. I condizionamenti più forti sono invece imposti dalle opere di difesa spondale, le cosiddette "primate" in calcestruzzo, realizzate negli anni '60 e '70 del secolo scorso per recuperare spazio all'agricoltura e per buona parte ad oggi non più strategiche ai fini della difesa idraulica e in alcuni casi addirittura interferenti.

Le proposte di intervento più rilevanti per il tratto superiore riguardano pertanto la dismissione, per buona parte, di tale sistema di opere spondali, funzionale al recupero della continuità laterale del trasporto solido e al ripristino di un assetto pluricursale dell'alveo.

La riattivazione dei rami laterali, dovendo gli stessi essere attivi perlomeno a partire da valori di portata ordinaria e formativa, dovrà in alcuni casi prevedere attività di scavo che chiaramente dovranno essere progettate tenendo conto dell'attuale assetto ecologico della regione fluviale ed individuando i necessari interventi di rinaturazione delle attuali aree golenali.

L'esempio di intervento a confluenza Dora Baltea è significativo in tal senso: è prevista la dismissione dell'opera di difesa spondale presente in sponda sinistra della Dora e la riattivazione dei due rami laterali (Fig. 17).

Esempio di intervento programmato nel tratto inferiore del corso del fiume Po

A valle di Isola Serafini, fino alla confluenza del Mincio, il fiume presenta un alveo monocursale sistemato per la navigazione con opere di sponda (pennelli) continue, disposte in modo alternato su entrambe le sponde e realizzate per la massima parte nel decennio 1955-1964. L'alveo era dimensionato per contenere una portata di 400 m³ s⁻¹ corrispondente alla magra ordinaria, ma a causa dell'abbassamento del fondo, la portata contenuta nell'alveo di magra è aumentata fino

a raggiungere il valore odierno di circa $5000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ corrispondente alla piena ordinaria.

Tale situazione non apporta nessun vantaggio alla funzionalità della linea navigabile ma, viceversa, impedisce, nella maggior parte degli eventi di piena, l'espansione nelle aree golenali e la riattivazione da monte delle lanche che, dove ancora presenti, sono in via di progressiva e completa sedimentazione. Sul fondo alveo, unica porzione della sezione del corso d'acqua non difesa, si manifestano così forti sollecitazioni dinamiche che generano ulteriore erosione e conseguente abbassamento dello stesso. È evidente che tale processo, se non disinnescato attraverso azioni strutturali di modifica del sistema delle opere, finisce per autoalimentarsi.

Le proposte di intervento sono pertanto finalizzate a garantire la mitigazione degli effetti provocati dall'abbassamento del fondo alveo sul sistema delle opere in alveo e sull'ambiente, pur nel rispetto degli usi in atto e della richiesta di sicurezza del territorio difeso da arginature maestre.

Le proposte di intervento per tale tratto prevedono l'abbassamento dei pennelli di navigazione in modo tale che gli stessi siano tracimabili per portate superiori a $800\text{-}1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e la riattivazione dei rami laterali in modo tale da ripristinare, a partire da tali portate, un alveo a più rami (Fig. 18).

CONCLUSIONI E POSSIBILI SVILUPPI FUTURI

La conoscenza dettagliata delle forme fluviali e dei principali processi modificativi intercorsi nel recente passato ha consentito di definire, nell'ambito del *Programma generale di gestione dei sedimenti* recentemente approvato, l'assetto di progetto e le proposte di intervento indispensabili per il raggiungimento degli standard di sicurezza e di qualità ambientale previsti dalla pianificazione di bacino vigente e dalle Direttive europee (2006/60/CE e 2007/60/CE).

La necessità di restituire dinamicità ai processi morfologici –non regolandoli a priori bensì assecondandone lo sviluppo– e di avere conseguentemente forme fluviali non “fossili” bensì periodicamente inondate, trasformate e modellate già a partire dalle portate ordinarie è un'esigenza primaria nella gestione e riqualificazione dell'alveo del fiume Po.

Obiettivo principale dell'assetto di progetto proposto nel *Programma generale di gestione dei sedimenti* è pertanto quello di conseguire un alveo non determinato a priori, ma che possa evolvere in naturalità recuperando condizioni di equilibrio dinamico all'interno di una fascia di mobilità compatibile con i numerosi vincoli presenti lungo l'asta fluviale, fra cui in particolare il sistema delle arginature maestre, strategico per la difesa di buona parte della pianura padana dagli eventi di piena più intensi.

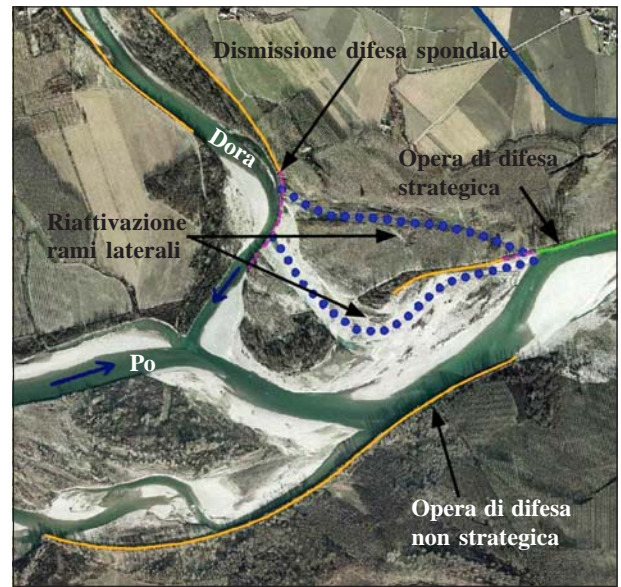


Fig. 17. Intervento di riqualificazione alla confluenza tra Dora Baltea e Fiume Po: dismissione di una difesa spondale e riattivazione di due rami laterali.

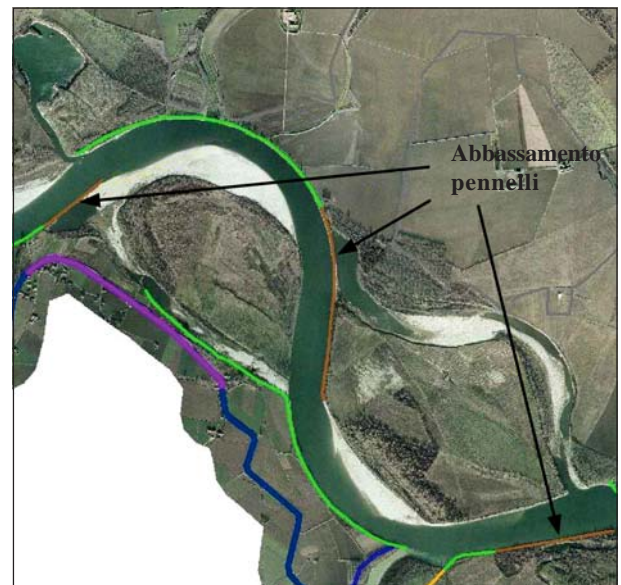


Fig. 18. Intervento di abbassamento dei pennelli di navigazione alla confluenza del Taro.

A tal riguardo lo strumento che potrebbe agevolare e facilitare il conseguimento di tale assetto di progetto dell'alveo fluviale è rappresentato dalle fasce di mobilità del corso d'acqua. La Segreteria tecnica dell'Autorità di bacino sta lavorando alla definizione di criteri e indirizzi di usi del suolo compatibili con tali fasce. In particolare sono in fase di elaborazione criteri di gestione per le fasce morfologiche, delimitate secondo il metodo già descritto ai paragrafi precedenti.

La fascia di mobilità di progetto individua la porzione di regione fluviale entro la quale garantire, attraverso la tutela dei processi morfologici, e incentivare, attraverso l'attuazione degli interventi previsti dal *Programma generale di gestione dei sedimenti*, la mobilità dell'attuale alveo inciso del fiume Po. All'interno di tale fascia, oltre all'attuale alveo inciso, sono pertanto ricomprese tutte quelle aree che costituiscono l'ambito principale di intervento.

La fascia di tutela morfologica e ambientale individua la porzione di regione fluviale da tutelare in relazione alla presenza di forme morfologiche relitte che, anche se non più attive nelle dinamiche idrauliche e morfologiche ordinarie, costituiscono elementi rilevanti per il loro valore ambientale connesso alla presenza di habitat acquatici e ripariali.

In relazione infine alle attività di monitoraggio si evidenzia come la caratterizzazione delle forme fluviali effettuata nel 2005 con la realizzazione dei rilievi topografici, LIDAR e batimetrici possa rappresentare un "anno zero" sul quale impostare le attività future finalizzate ad aggiornare il bilancio del trasporto solido e verificare l'efficacia degli interventi previsti ed attuati lungo l'asta fluviale.

Ringraziamenti

Le analisi e i dati descritti nel presente articolo sono tratti dagli studi propedeutici al Programma generale di gestione dei sedimenti del fiume Po realizzati dallo Studio Paoletti Ingegneri Associati ed in particolare redatti dall'ing. Stefano Croci e dal dott. Giovanni Savazzi.

BIBLIOGRAFIA

- AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO, 2008. *Fiume Po da confluenza Suora di Lanzo a Pontelagoscuro*. Parte 1 Cartografia delle variazioni planimetriche dell'alveo del fiume Po. Parte 2 Cartografia delle caratteristiche geomorfologiche dell'alveo e delle aree inondabili del fiume Po. Disponibile su: http://www.adbpo.it/download/a-atlanti%20del%20Po/Po_Atlante_Geomorfologico/
- CATI L., 1981. *Idrografia e Idrologia del Po*. Pubblicazione n° 9 dell'Ufficio Idrografico del Po, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- CHURCH M., HAM D., WEATHERLY H., 2001. *Gravel management in lower Fraser River*. Final Report for The City of Chilliwack, <http://www.geog.ubc.ca/fraserriver/publications.html>.
- FILIPPI F., COLOMBO A., BANCHINI G., CAVAZZINI A., LOMBARDO G., MANZINO A., 2004. Il nuovo DTM dell'Autorità di bacino del fiume Po. *VIII Conferenza ASITA 14-17 dicembre 2004*
- GOVI M., TURITTO O., 1993. Processi di dinamica fluviale lungo l'asta del Po. *Acqua Aria* **6/1993**: 575-588
- MALAVOI J.R., BRAVARD J.P., PIEGAY H., HEROIN E., RAMEZ P., 1998. *Determination de l'espace de liberte des cours d'eau*. Bassin Rhone Mediterranee Corse, Guide Technique N°2, 39 pp.
- NIER/CER, 1982. *Indagine fotointerpretativa dell'alveo del Fiume Po dalla confluenza del Tanaro a Pontelagoscuro*. Studio Geologico GEOMAP di Firenze (studio inedito).
- PAOLETTI A., BRAGA G., COLOMBO A., CROCI S., PEDUZZI G.B., SAVAZZI G., 2007. La gestione dei sedimenti alluvionali dell'alveo inciso del fiume Po. *Acqua Aria* **2/2007**: 21-36
- RAPP C.F., ABBE T.B., 2003. *A Framework for Delineating Channel Migration Zones*. Ecology Publication #03-06-027, Washington State Department of Transportation, 66 pp.
- RINALDI M., SURIAN N., 2005. Variazioni morfologiche ed instabilità di alvei fluviali: metodi ed attuali conoscenze sui fiumi italiani. In: Brunelli M., Farabollini P. (eds.), *Dinamica Fluviale*, Atti Giornate di Studio sulla Dinamica Fluviale, Grottammare, Giugno 2002, Ordine dei Geologi delle Marche: 203-238.
- RINALDI M., 2006. La Geomorfologia nella gestione degli alvei. *Atti del convegno Nuovi approcci per la comprensione dei processi fluviali e la gestione dei sedimenti*. Sarzana, ottobre 2006, Autorità di bacino interregionale del fiume Magra.