



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE
DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE

CORSO DI LAUREA IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE

Dinamica storica del trasporto dei solidi sospesi nel bacino del Po: analisi delle traiettorie e ipotesi sui possibili fattori causali

Relatore

Prof. Simone Bizzi

Correlatore

Dott. Andrea Brenna

Laureanda

Francesca Maria Faroni

matr. 2007895

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

RIASSUNTO	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUZIONE	7
1.1. Corsi fluviali e implicazioni delle variazioni nel trasporto solido	9
1.2. Bilancia di Lane	10
1.3. Tipi di modifiche della morfologia del fiume	12
2. CASO STUDIO	13
2.1. Inquadramento del Po e descrizione del caso studio	13
2.2. Statistiche sull'evoluzione del corso fluviale	15
2.3. Localizzazione del tratto, dei pennelli e delle stazioni di monitoraggio	15
3. MATERIALI E METODI	16
3.1. Dati utilizzati e fonti	16
3.1.1 Portata solida e diverse categorie in cui si divide	18
3.2. Dati sulla composizione del sedimento bloccato dietro i pennelli fluviali	19
4. RISULTATI E DISCUSSIONE	19
4.1. Grafici elaborati dai dati	19
4.2. Discussione e analisi di tendenze e eventuali anomalie	26
4.2.1. Ipotesi sulle motivazioni della differenza tra le stazioni di piacenza e pontelagoscuro nel periodo 1963-1970 e verifica	27
4.2.2. Ipotesi sulle motivazioni della rinnovata forte diminuzione della torbidità nel più recente periodo 2010-2019	29
5. CONCLUSIONE	30

RIASSUNTO

La letteratura scientifica inerente la geomorfologia fluviale ha da tempo dimostrato come la maggior parte dei fiumi italiani abbia subito profonde modificazioni strutturali a causa di interventi antropici che sono andati a diminuire l'apporto di sedimenti. Gli studi sinora condotti sono stati in grado di spiegare le cause della diminuzione del trasporto di "bed material", cioè componenti del letto e delle sponde inferiori del fiume, ma non della diminuzione, altrettanto importante e dimostrata, del trasporto di "wash material", cioè materiali presi in carico dal flusso e trasportato in sospensione.

La ricerca intende dimostrare l'esistenza di una diretta e specifica relazione causa-effetto tra le opere di canalizzazione effettuate negli Anni '50 lungo il Po e la diminuzione del trasporto in sospensione per intrappolamento di grandi quantità di sedimenti fini componenti il "washload" deducendone l'influenza su andamento del trasporto e morfologia.

Allo scopo di rilevare in modo scientificamente robusto la fondatezza di questa ipotesi, si sono raccolti e studiati i dati alle stazioni di Piacenza e Pontelagoscuro (relativamente a monte e a valle dell'intervento antropico) resi disponibili dall'Arpa Emilia Romagna concernenti cinque variabili idrologiche nel periodo dal 1916 al 2021.

L'analisi è stata condotta su sei macroperiodi attraverso la costruzione e l'esame di regressioni lineari specifiche per ciascuno di essi. Queste hanno rivelato una fase, dal 1956 al 1970, coincidente con quella di maggiore influenza delle opere di navigazione, che vede opporsi a un tasso rilevante di decrescita del trasporto in sospensione nella stazione a valle del disturbo, un andamento contrario nella stazione a monte del disturbo. Questa anomalia ha indirizzato analisi più approfondite a un confronto tra il valore di diminuzione del trasporto torbido e la stima del quantitativo di sedimenti fini bloccati dietro alle opere di canalizzazione in uno stesso periodo di impatto di queste ultime, rivelando valori significativamente paragonabili.

L'intrappolamento di sedimenti fini che sembra quindi concretizzarsi come risultato delle opere realizzate, esercita un effetto morfogenetico attraverso l'innalzamento del fondo dei canali secondari, che diventano così superfici di terrazzo dando restringimento dell'alveo con conseguente concentrazione della portata liquida e aumento di energia che contribuisce all'incisione del corso fluviale.

ABSTRACT

Scientific literature relating to river geomorphology has long demonstrated how the majority of Italian rivers have undergone profound structural modifications due to anthropic interventions which have decreased the sediment supply. The studies conducted so far have been able to explain the causes of the decrease in the transport of "bed material", i.e. components of the bed and lower banks of the river, but not the equally important and demonstrated decrease in the transport of "wash material", i.e. materials taken up by the flow and transported in suspension.

The research wants to demonstrate the existence of a direct and specific cause-effect relationship between the canalization works carried out in the 1950s along the Po river and the decrease in suspended sediment transport due to the entrapment of large quantities of fine sediments composing the "washload", deducing the influence on transport ability and morphology.

In order to reveal the validity of this hypothesis in a scientifically strong way, data made available by Arpa Emilia Romagna concerning five hydrological variables in the period from 1916 to 2021 at the Piacenza and Pontelagoscuro stations were collected and studied (relatively upstream and downstream of the anthropic intervention).

The analysis was conducted on six macro-periods through the construction and examination of specific linear regressions for each of them. These revealed a phase, from 1956 to 1970, coinciding with that of greatest influence of the navigation works, which saw a significant rate of decrease in suspended transport in the station downstream of the disturbance, in contrast with a contrary trend in the station upstream of the disturbance. This anomaly directed more in-depth analyses to a comparison between the value of decrease in suspended sediment transport and the estimate of the quantity of fine sediments blocked behind the canalization works in the same period of impact of the latter, revealing significantly similar values.

The trapping of fine sediments which therefore seems to happen as a result of the works carried out, exerts a morphogenetic effect through the raising of the secondary channels, which thus become terrace surfaces giving narrowing of the riverbed with consequent concentration of the liquid flow and increase of energy that contributes to the incision of the river course.

1. INTRODUZIONE

La Geomorfologia Fluviale può essere sinteticamente definita come lo “studio dei processi di produzione, flusso e immagazzinamento di sedimenti nel bacino idrografico e nell’alveo fluviale nella breve, media e lunga scala temporale, e delle forme risultanti nell’alveo e nella piana inondabile” (1)(2).

Vari studi hanno evidenziato come nel recente periodo storico molti siano stati i sistemi fluviali che hanno subito sovrasfruttamento del territorio e dell’alveo stesso da parte dell’uomo in diverse aree della terra; ciò è stato causa di intense modificazioni anche a livello italiano dove, in particolar modo nel corso della seconda metà del XX secolo, la morfologia e la dinamica della maggior parte dei fiumi ha subito profonde trasformazioni (3). L’entità delle trasformazioni subite è stata considerevole e ha portato in molti casi a una modificazione della configurazione morfologica stessa.

Nella grande attenzione che la letteratura ha recentemente dato a questi processi, sempre più rilevanza ha assunto la connessione tra semplificazione morfologica (evoluzione da pluricorsale a prevalentemente monocorsale), incisione e restringimento dell’alveo, con una diminuita disponibilità dei sedimenti rispetto alla portata liquida.

Nella seconda metà dello scorso secolo sul Po è stata rilevata in media una diminuzione del 50% per il trasporto del sedimento in sospensione e del 20% per il trasporto del materiale che costituisce l’alveo(4)(5).

I processi più diffusi registrati sono stati restringimento e incisione dell’alveo, con una riduzione media della larghezza superiore al 50% fino a valori dell’85-90%, e abbassamento del fondo dell’ordine di alcuni metri arrivando localmente a valori di 10/12 m (6)(7).

Le alterazioni nel contesto italiano sono state ampiamente studiate e sono in generale riconducibili a prelievi di sedimenti dagli alvei, dighe, interventi di canalizzazione, variazioni di uso del suolo a scala di bacino e sistemazioni idraulico-forestali che hanno modificato in maniera importante l’equilibrio tra portata solida e liquida dei corsi d’acqua.

L’analisi in letteratura delle cause della diminuzione di sedimento attraverso cui impatta generalmente l’intervento antropico riguarda principalmente il “bed material load” di un fiume.

Sono appartenenti alla categoria “bed material” quei sedimenti componenti il letto e le sponde inferiori del fiume, trasportati sia al fondo che in sospensione a intermittenza, e che, essendo per definizione parte costituente dell’alveo, hanno un ruolo determinante sulla morfologia del canale (8).

Da questo si differenzia il “wash material”, materiale che, una volta preso in carico dal flusso, viene trasportato per lunghe distanze in sospensione, ed esce dal tratto fluviale senza depositarsi in alveo.

Il ruolo morfogenetico di questo materiale è apparentemente nullo essendo parte dell'alveo solo in quantitativi minoritari come intrappolamento interstiziale nel sedimento più grossolano (8).

Se infatti la riduzione del trasporto in sospensione nelle ultime decadi è già stata rilevata (4), le cause che la generano sono state decisamente meno studiate riferendosi spesso in maniera generica a usi del suolo a scala di bacino senza nessuna quantificazione dei veri fattori causali.

Al centro della seguente ricerca, che va ad indagare l'interazione precedentemente non considerata tra opere di canalizzazione fluviale e sedimento fine, e il loro impatto antropico, c'è tuttavia proprio questa seconda tipologia di materiale.

L'obiettivo della seguente trattazione è infatti la verifica, in un contesto generale e riconosciuto di diminuzione significativa del trasporto in sospensione negli alvei italiani, di una capacità di filtraggio delle opere di navigazione costruite lungo il Po, e la conferma e quantificazione dell'impatto specifico che hanno avuto su questo calo.

Quando si parla di opere di canalizzazione ci si riferisce a costruzione di strutture atte al controllo da parte dell'uomo del flusso del fiume per assicurarne la concentrazione nel canale principale in condizioni di bassa portata.

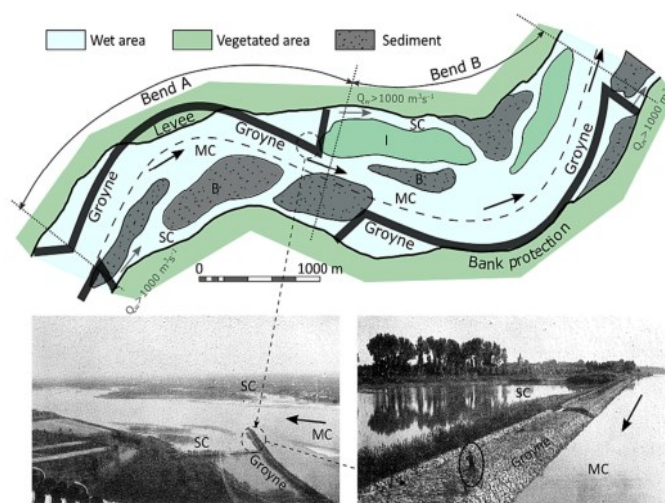


Figura 1-Schema di una struttura di navigazione nel Po; Foto storiche degli anni 40. MC=main channel, SC=secondary channel

Queste opere hanno come obiettivo la navigabilità permanente di un settore fluviale dove questa sia spesso impedita a causa delle basse profondità, e vanno ad obbligare tratti di fiume a conformazione multicorsale ad avere una temporanea struttura monocorsale sinuosa.

Possono essere presenti sulla piana inondabile (argini), sulle sponde (difese di sponda) o nel canale attivo (pennelli).

Lungo il corso del Po queste strutture ingegneristiche sarebbero più nello specifico identificabili nei pennelli fluviali costruiti intorno agli anni '50 del secolo scorso all'interno dell'alveo stesso.

Limitando il deflusso attraverso i canali secondari questi potrebbero aver intrappolato quantitativi di sedimenti fini importanti, sollevando la quota del fondo dei tratti dietro di essi trasformandoli in superfici di terrazzo.

La verifica di questa ipotesi, che vedrebbe un contributo importante delle opere di navigazione alla diminuzione di sedimento fine, evidenzerebbe anche come questo possa dare forti modificazioni dell'alveo attraverso l'enfaticizzazione di restringimento, incisione e semplificazione morfologica dello stesso. Per dimostrarla si è fatto un'analisi della serie storica di dati di portata torbida, al fine di riscontrare un segnale di filtraggio da parte dei pennelli al netto della diminuzione generale comunque presente del trasporto solido dovuta ai cambiamenti di uso del suolo.

Lo studio di questi processi, finora non considerati e dimostrati, è molto importante non solo per il caso specifico del Po, ma perché permetterebbe per la prima volta di tenere in considerazione nei modelli geomorfologici concettuali di evoluzione¹ anche questi come parte delle cause di alterazione strutturale di un alveo fluviale, comprendendo meglio le dinamiche di determinati processi evolutivi per consentire una migliore pianificazione di eventuali interventi di stabilizzazione e riqualificazione. Per comprendere quindi il funzionamento generale dell'equilibrio di un alveo fluviale e la sua interazione con l'ambiente circostante, seguono come intermezzo prima dell'esposizione di caso studio e i metodi utilizzati per dimostrare l'ipotesi, dei capitoli introduttivi di spiegazione dei concetti base di geomorfologia.

1.1.Corsi fluviali e implicazioni delle variazioni nel trasporto solido

La variazione nel lungo e breve termine del trasporto solido è influenzata da un numero ampio di fattori naturali e antropici e può avere importanti implicazioni sull'ecosistema acquatico e fluviale, influenzandone ad esempio il tracciato e determinandone le interazioni con l'ambiente.

Le pressioni antropiche che vanno ad impattare sull'equilibrio dei corsi fluviali, possono essere classificate in due categorie: quelle attuate nel fiume per lo sfruttamento delle risorse naturali (come nel caso di dighe per la produzione di energia, estrazioni di sedimenti dal canale e cambi di uso del

¹ un modello geomorfologico concettuale di evoluzione è uno schema evolutivo che riporta una precisa sequenza temporale dei processi dominanti di aggiustamento e la successione dei diversi tipi di variazione morfologica che si susseguono sistematicamente nello spazio e nel tempo. L'importanza di un tale strumento, come evidenziato nel Manuale IDRAIM dell'ISPRA (3) non è costituita dalla semplice descrizione dell'evoluzione di uno specifico sistema fluviale studiato, ma è insita nella comprensione dell'evoluzione storica e delle dinamiche che possono portare a determinate modificazioni, che permette il risvolto estremamente applicativo di una pianificazione sensata di interventi e strategie di stabilizzazione o di riqualificazione fluviale basata sull'evoluzione reale del fiume più che su un modello generico.

suolo) o quelle relative a opere di canalizzazione atte a controllare la morfologia del canale e i processi che regolano le portate nel fiume inibendone la mobilità laterale (9)(10).

Entrambe queste categorie alterano la stabilità modificando il rapporto tra trasporto solido e liquido nell'alveo.

La centralità di questo rapporto per il fiume è stata scoperta grazie all'affermarsi dagli anni '30 della cosiddetta "teoria del regime" e del concetto di "fiume regolarizzato" di Mackin.(11).

Se ci riferiamo infatti a scale temporali minori rispetto a quelle della teoria dei cicli di erosione, considerata esaustiva fino a quel momento, vediamo che, come puntualizzato da Schumm e Lichty (12), le variazioni della morfologia saranno determinate principalmente da alterazioni del trasporto.

A definire l'equilibrio e quindi la configurazione sono infatti, secondo questa teoria, proprio le variabili guida del sistema, e la condizione stessa di equilibrio è definibile come condizione in cui i flussi di portata liquida e solida scorrono senza dare variazioni nette nella forma.

Nel momento quindi in cui viene disturbata la condizione di equilibrio iniziale, si spinge il fiume a rispondere a tale perturbazione movendosi verso uno nuovo, passando per una fase di instabilità caratterizzata da variazioni significative.

La comprensione del concetto di equilibrio dinamico in cui si trova un fiume è quindi fondamentale per capire in che modo gli interventi antropici ne influenzano la stabilità.

1.2. Bilancia di Lane

L'equilibrio dinamico di un fiume dipende da variabili guida e condizioni a contorno che lo influenzano. Le condizioni al contorno imposte sono rappresentate dall'energia del rilievo, dalle pendenze, dalla topografia e dalla morfologia delle valli, ecc. mentre le variabili guida del sistema, come già detto, sono portata liquida e solida.

Per meglio comprendere la relazione generale tra variabili guida e struttura di un fiume vi è la teoria di Lane che permette di conoscere a grandi linee le risposte che esso darà a eventuali alterazioni indotte. È importante tenere in considerazione che la teoria si riferisce principalmente alla componente più grossolana (e determinante le morfologie) del fiume, ma rimane d'aiuto per la comprensione delle dinamiche e interazioni tra portata solida e portata liquida.

Il rapporto tra queste due variabili è infatti indicativo della potenza di cui la corrente disporrà per il trasporto di determinati sedimenti in quantità e dimensioni specifiche.

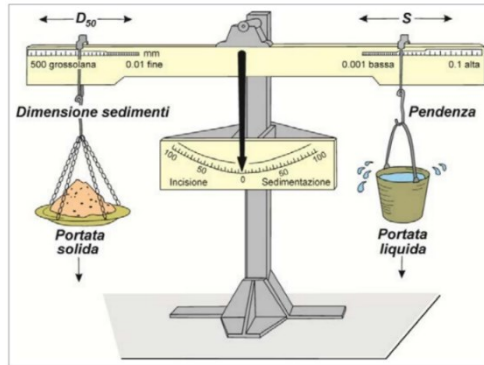


Figura 2-Modello concettuale delle risposte di un alveo fluviale all'alterazione dell'equilibrio, Lane(13)

La relazione di LANE dice che (13)(Figura 2): $QS \approx Q_s D_{50}$

dove Q rappresenta la portata liquida, S la pendenza del fondo, Q_s la portata solida e D_{50} il diametro medio dei sedimenti del fondo.

Per una determinata energia del flusso, determinate quantità di sedimenti di uno specifico calibro possono essere trasportate.

Se il flusso ha quindi una potenza o energia sufficiente per mettere in moto le particelle di sedimento che compongono il fiume, si avrà incisione o trasporto, in caso contrario si avrà sedimentazione.

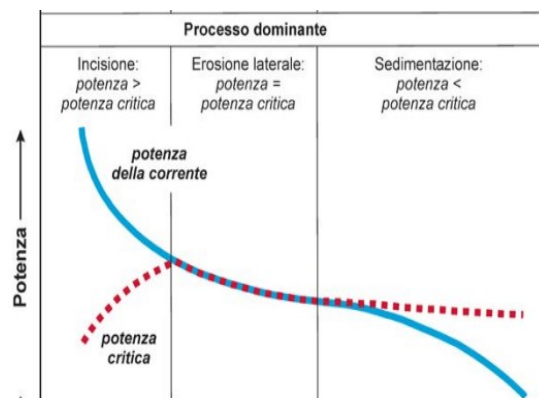


Figura 3-Schematizzazione del rapporto tra potenza e potenza critica della corrente (15)

Il bilanciamento delle variabili determina quale sarà la potenza della corrente rispetto alla potenza critica (soglia di innesco del trasporto solido) e quindi la propensione a incidersi o vedere deposizione o movimento laterale del canale.

Una concentrazione del trasporto liquido in un canale in cui l'energia era minore, accompagnata da una minore quantità di sedimenti rispetto a quelli già trasportati, vedrà quindi la capacità di incisione del flusso aumentare, come supponiamo sia accaduto nel nostro caso.

Le "governing conditions" diventano perciò ciò che ci permette di comprendere il passaggio di un fiume da una forma morfologica all'altra, risalendo alla ragione della direzione presa e l'eventuale spinta data dall'uomo ad essa.

Dal momento che il Po è un fiume alluvionale a fondo mobile (corso fluviale auto-formato in cui letto e sponde sono modellati da entità e frequenza delle piene) le correlazioni tra trasporto solido e morfologia saranno ancora più importanti. In questo tipo di corso i tre processi principali (erosione, trasporto e deposizione) si susseguono nei diversi tratti secondo lo schema proposto da SCHUMM nel 1977 (14) sono ancora più strettamente connessi alla morfologia degli stessi.

Il suo paragone del fiume a un nastro trasportatore che convoglia i sedimenti dalle zone sorgenti attraverso la zona di trasferimento, alle pianure alluvionali (zona di accumulo), evidenzia come l'equilibrio tra i diversi processi determini in che misura agiscono e come modellano la morfologia nei vari tratti. Il predominare di un processo rispetto all'altro può cambiare nel tempo ed essere influenzato dai fattori esterni(15).

1.3. Tipi di modifiche della morfologia del fiume

Un alveo fluviale reso instabile può rispondere con variazioni altimetriche, di larghezza e configurazionali. Tali processi possono essere concentrati in tratti brevi (erosione o sedimentazione localizzata) o interessare tratti molto lunghi migrando da valle a monte o viceversa.

Poiché cambiamenti di un corso fluviale portano a un suo diverso rapporto con l'ambiente circostante, uno studio adeguato dei processi di trasporto è fondamentale in quanto centrali sia perché modificabili da fattori esterni, sia perché in grado di modificare a loro volta il fiume e come appena detto i suoi rapporti con ciò che lo circonda.

Alterazioni dell'equilibrio generate da un incremento dell'energia della corrente (o potenza) possono causare un abbassamento generalizzato della quota del fondo definito incisione; quando si verifica il contrario si parla normalmente di sedimentazione.

Tagli di meandro, restringimenti e canalizzazioni come quelle da noi studiate, hanno l'effetto prevalente di incrementare la capacità di trasporto come conseguenza dell'incremento di pendenza o riduzione di larghezza e concentrazione del flusso, inducendo un'incisione.

Effetto diverso avranno una diga, che principalmente darà incisione per l'annullamento dei sedimenti nella zona subito successiva, o una escavazione diretta, che darà migrazione verso monte

dell'alterazione attuata per la modificazione del profilo del fondo indotta dallo scavo (erosione regressiva) o, più raramente, incisione a valle per la deposizione di sedimenti all'interno dello scavo e il conseguente deficit.

Per quanto riguarda le possibili variazioni di larghezza, meno studiate di quelle altimetriche e meno agevolmente inquadrabili secondo gli schemi interpretativi esposti finora, queste sono, secondo Schumm soggette a relazioni che esprimono la proporzionalità diretta tra l'allargamento e le portate liquida e solida a parità di altri fattori (14).

Il cambiamento di configurazione morfologica planimetrica, come la semplificazione vista nel Po, può essere dato sia da vere e proprie opere di canalizzazione e navigazione (che hanno l'obiettivo diretto di controllare la morfologia), che da un'alterazione tale delle variabili guida da modificare larghezza e pendenza abbastanza da superare valori soglia che controllano il passaggio da una configurazione ad un'altra (caratterizzate da specifici intervalli di pendenza e confinamento).

I cambiamenti morfologici possono poi derivare da interventi a scala di bacino protratti per lunghi periodi e su vaste aree; i disboscamenti ad esempio accelereranno l'erosione del suolo sui versanti determinando un grande incremento della quantità di materiale che alimenta il trasporto solido, mentre i rimboschimenti avranno effetto contrario (16)(17).

2. CASO STUDIO

2.1. Inquadramento del Po e descrizione del caso studio

Il fiume Po, con una lunghezza totale di 651 km e un'area di drenaggio di 75.000 km² è il fiume più lungo d'Italia. Il bacino è delimitato a nord e a ovest dalle Alpi, e a sud dagli Appennini. La portata media annua all'uscita del bacino è 1470 m³/s con una portata massima registrata alla stazione di Pontelagoscuro tra i 2400 e i 9520 m³/s nel periodo tra il 1940 e il 2010 (18)(19).

La pianura padana, essendo la maggiore in Italia, è stata molto attraente per l'insediamento umano e ha vissuto negli ultimi secoli uno sfruttamento intensivo dal punto di vista agronomico, industriale e di sviluppo urbano raggiungendo la massima intensità nel XX secolo.

Conseguentemente una lunga storia di pressioni antropiche ha agito sul fiume e sul bacino idrografico del Po; forte estrazione di sedimenti tra gli anni 50 e 90, la costruzione di opere come la diga Isola Serafini nel 1964, e altre pressioni come quella esercitata da rimboschimenti forzati, hanno causato nel tempo una profonda diminuzione dell'apporto di sedimenti che ha portato a cambiamenti morfologici intensi lungo il corso fluviale.

Il corso del Po può essere diviso in quattro parti: “Settore di monte” dalla sorgente alla confluenza con il Ticino; “Settore intermedio” dalla confluenza con il Ticino a quella con il Secchia; “Settore di valle” fino all’inizio del delta e “Delta”. Muovendosi dal primo all’ultimo c’è una evidente diminuzione della pendenza media del corso fluviale.

Dati topografici sui settori intermedio e di valle che coprono il diciannovesimo secolo fino al 2006 hanno evidenziato che la stabilità dell’alveo presente fino al 1960, è stata seguita da incisione intensa, poi continuata a lungo anche se con progressivamente minore intensità, tra il 1960 e il 1990 a causa delle grandi pressioni antropiche (19)(20).

Oltre alle usuali fonti di pressione antropica, il fattore aggiuntivo che abbiamo voluto prendere in considerazione è stato lo schema di canalizzazione finanziato dal governo per controllare le dinamiche fluviali a basse portate.

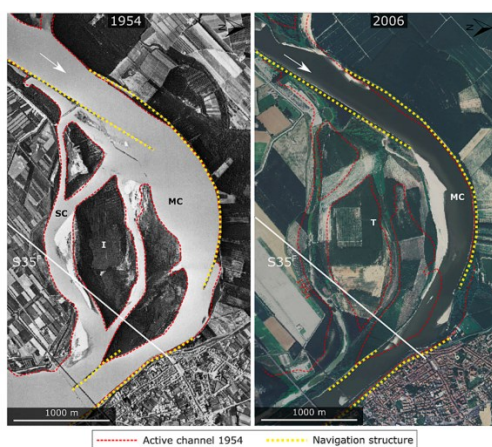


Figura 4-Esempio di evoluzione morfologica di un settore del Po dove i canali secondari sono "protetti" dalle strutture di navigazione.

La progettazione approvata nel 1931 per assicurare la navigabilità del Po di estese opere ingegneristiche (51 in totale) nel settore compreso tra il fiume Adda e il fiume Secchia, consisteva nella costruzione di pennelli composti da materiale fine coperto da ciottoli e lastre di pietra, capaci di concentrare il flusso in un singolo canale rendendolo così navigabile (e temporaneamente a geometria sinuosa (21)(22)).

2.2.Statistiche sull'evoluzione del corso fluviale

I numerosissimi interventi, escavazioni, costruzioni e dighe hanno portato a una diminuzione media stimata del 50% per i sedimenti in sospensione e del 20% per quelli di letto (4)(5), a un'incisione del canale mediamente tra i 2.5 e i 3.5 m nella zona del Po Intermedio e a una riduzione della sua larghezza mediamente del 20% con picchi del 50%, accompagnata da una semplificazione morfologica estremamente importante (5)(20)(22)(23)(24).

Altro dato indicativo dell'importanza delle modificazioni sul Po è il confronto tra la portata originariamente in grado di superare i pennelli fluviali e quella attuale. Se i pennelli erano infatti stati costruiti inizialmente con una altezza di progetto tale da essere superata da un flusso pari a circa 1000 m³/s (una portata che nel Po Intermedio avveniva per approx. 180 giorni all'anno e permetteva all'acqua di fluire nei canali che si trovavano dietro le strutture già in condizioni moderate di trasporto), questo valore è progressivamente aumentato negli anni fino ad arrivare oggi ad essere pari ad almeno due o tre volte quello iniziale(22). Questa variazione ci dice che il flusso si è concentrato in maniera molto importante nella parte del canale non protetta dalle strutture e così ha fatto anche l'incisione su di esse attraverso un meccanismo a feedback positivo (5) tale per cui un aumento della concentrazione del flusso porta a un aumento dell'incisione, che innalza il valore necessario perché il flusso riesca a dividersi occupando anche i canali centrali senza concentrarsi ulteriormente in quello principale.

La combinazione quindi dell'abbassamento dell'alveo dovuto alla sottoalimentazione di sedimento solido per escavazioni e chiusura di dighe, e la funzione di intrappolamento ipotizzata, potrebbe costituire il meccanismo evolutivo che ha portato agli importanti dislivelli che ad oggi si osservano fra il thalweg del canale principale e le superfici terrazzate.

2.3.Localizzazione del tratto, dei pennelli e delle stazioni di monitoraggio

Le nostre analisi si sono concentrate su uno specifico tratto del Po, situato nella regione Emilia Romagna nella sezione tra Piacenza e Pontelagoscuro, dove sono localizzate queste due stazioni di monitoraggio dell'ArpaEmilia che si trovano rispettivamente una a monte e una a valle della zona in cui si concentrano le opere di canalizzazione (tra la confluenza dell'Adda e del Secchia).

La zona studiata è caratterizzata da una pendenza media che va da 0.027% a 0.010% circa (5), i "bed materials" che la caratterizzano ricadono principalmente nella categoria delle sabbie medie, e le stazioni selezionate dreneranno una un'area di bacino non influenzata dai pennelli (Piacenza), e l'altra un'area che ne è influenzata (Pontelagoscuro).

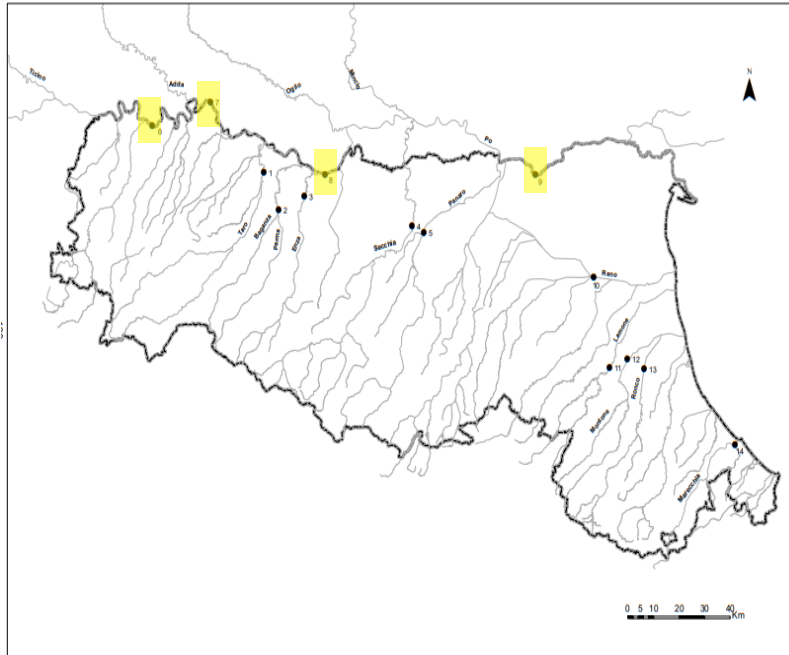


Figura 5- rappresentazione dei corsi fluviali in Emilia-Romagna e della localizzazione delle stazioni di monitoraggio dell'ARPA.

Tra le stazioni indicate numericamente nella mappa a sinistra, quelle presenti nella tabella riguardante tutti i dati raccolti e prese in considerazione nell'analisi sono:

6. Piacenza; 7. Cremona (Polesine Parmense); 8. Boretto; 9. Pontelagoscuro

3. MATERIALI E METODI

3.1. Dati utilizzati e fonti

Le variabili guida, determinanti per la morfologia fluviale, che si è deciso di considerare nella raccolta dati in quanto capaci di evidenziare eventuali differenze che permettessero di riconoscere l'impatto dei pennelli, sono state portata liquida, trasporto solido in sospensione e torbidità; le ultime due sono di particolare importanza nel nostro caso data l'attenzione specifica ai materiali fini in sospensione dello studio. Il confronto tra queste variabili nel tempo ha permesso un confronto tra l'evoluzione dei processi di trasporto alle due stazioni.

I dati sono stati ottenuti grazie ai monitoraggi dell'Arpa Emilia-Romagna e ai suoi annali idrologici contenenti le caratteristiche e variabili idrologiche e idrometriche negli anni (che partono dal 1916 per Pontelagoscuro e dal 1922 per Piacenza) (27).

I monitoraggi riguardanti le variabili sono eseguiti con cadenza giornaliera coincidente con i giorni lavorativi e riportati o analiticamente o attraverso il valore mensile medio, minimo o massimo che li riassume.

In caso di dato mancante (per giornate non lavorative, impedimenti alla navigazione, guasti alle imbarcazioni, ...) veniva effettuata un'interpolazione lineare per fillare la serie storica e comporre

medie e cumulate; se la mancanza di dati si protraeva a lungo si riteneva l'interpolazione origine di dati non accettabili e si procedeva non inserendola.

Il margine di errore per i casi in cui si decideva di eseguire l'interpolazione è ritenuto non significativo in quanto i gradienti di portata del Po hanno grossomodo variazioni plurigiornaliere.

Le misurazioni del trasporto torbido sono state eseguite fino al 2018 con Bottiglia Giandotti (attualmente in sostituzione con altri tipi di sonde multiparametriche più moderne) posizionata in verticali equidistanti lungo la sezione di misura a profondità di 1 m.

Ai fini di una maggiore e facilitata comprensione dei dati e delle variabili presenti nella tabella sottostante, segue ad essa una sezione esplicativa della definizione e delle possibili differenziazioni specifiche della "portata solida".

Tabella esemplificativa dei dati idrologici raccolti²

DATA	BORETTO				CREMONA				PIACENZA				PONTELAGOSCURO				
	torbidità med (kg/m ³)	torbidità max (kg/m ³)	Q liquida med (m ³ /s)	Q liquida max (m ³ /s)	torbidità med (kg/m ³)	torbidità max (kg/m ³)	Q liquida med (m ³ /s)	Q liquida max (m ³ /s)	torbidità med (kg/m ³)	torbidità max (kg/m ³)	Q liquida med (m ³ /s)	Q liquida max (m ³ /s)	torbidità med (kg/m ³)	torbidità max (kg/m ³)	Q liquida med (m ³ /s)	Q liquida max (m ³ /s)	
gen-1916													0,0480	0,1133	1193	1622	1605,500
feb-1916													0,1181	0,8000	1098	1896	430,075
mar-1916													0,4833	3,9910	3294	4704	4557,112
apr-1916													0,2267	3,2403	2867	4030	1868,423
mag-1916													0,1294	0,4087	2617	4157	1013,784
giu-1916													0,1216	0,2587	2861	3940	941,660
lug-1916													0,0974	0,5108	1903	2480	485,735
ago-1916													0,0510	0,1447	1313	1642	166,227
set-1916													0,3195	3,6367	1477	1826	1495,136
ott-1916													0,4127	2,5542	1982	3085	2554,318
nov-1916													0,7024	2,7367	3632	6038	8050,374
dic-1916													0,2107	5,1137	3625	5376	6149,304
gen-1917					0,0836	0,8467							0,2500	0,9300	2231	2885	1636,945
feb-1917					0,0006	0,0025							0,0006	0,0017	1515	1704	342,287
mar-1917					0,1714	1,7533							0,3973	2,3400	2213	3508	2508,033
apr-1917					0,1305	0,9500							0,2252	1,8100	1381	3100	1478,368
mag-1917					0,1951	0,8833							0,2846	3,0283	3631	7018	3305,602
giu-1917					0,1753	0,5500							0,2738	0,6933	4890	8683	3680,117
lug-1917					0,1113	0,3883							0,2005	3,3133	2230	3212	1335,313
ago-1917					0,3403	1,0525							0,2282	0,9917	2073	3811	1392,622
set-1917					0,0602	0,2567							0,1766	0,9083	1645	2010	735,545
ott-1917					0,0821	0,7425							0,5880	4,3367	1436	2547	2835,204
nov-1917					0,1388	0,2883							0,4398	3,8733	1549	2420	2033,321
dic-1917					0,0057	0,0275							0,0790	0,3792	1150	1332	241,523
gen-1918					0,0625	0,3383							0,2538	2,0133	1214	1515	844,192
feb-1918					0,1810	0,6170							0,0446	0,1792	1012	1138	111,778
mar-1918					0,5030	2,9600							0,4443	1,8700	1480	2450	2360,194
apr-1918					0,3033	1,2450							0,6434	2,4000	3054	5010	5493,073
mag-1918					0,0882	0,3617							0,3185	1,5500	3618	5394	3174,905
giu-1918					0,3221	2,6467							0,2281	0,7750	3180	5340	2333,673
lug-1918					0,5030	2,9600							0,1220	0,2900	1985	2578	676,122
ago-1918					0,0358	0,0900							0,0887	0,6183	1251	1567	368,799
set-1918					0,1011	0,8117							0,0927	0,3067	1250	2078	346,036
ott-1918					0,2720	1,7433							0,2808	0,7233	2862	4602	2426,053
nov-1918					0,0020	0,7125							0,1779	0,3800	2010	3156	692,396
dic-1918					0,9176	0,1217							0,1072	0,4283	1200	1384	348,024
gen-1919					0,4221	3,8050							0,6770	0,9450	2232	4240	5731,660
feb-1919					0,1004	0,5950							0,1769	0,9333	1373	1782	595,275
mar-1919					0,0467	0,1583							0,1186	1,1310	1434	1699	467,693
apr-1919					0,1629	0,0567							0,3249	4,5050	1874	3124	1719,460
mag-1919					0,0281	0,0942							0,1261	0,3625	1090	1404	378,102
giu-1919					0,0464	0,1700							0,0373	0,1533	1307	1548	129,180
lug-1919					0,0210	0,0825							0,1224	0,7608	1198	1400	413,020
ago-1919					0,0174	0,0868							0,0332	0,2550	1017	1308	98,408
set-1919					0,0202	0,1150							0,0246	0,0858	1025	1236	10,173
ott-1919					0,1460	0,7417							0,1449	0,2817	1821	2156	890,270
nov-1919					0,0798	0,6250							0,2260	2,8642	1655	2662	2516,955
dic-1919					0,0105	0,0267							0,0367	0,3883	1183	1622	212,637
gen-1920					0,1726	1,4682							0,1324	2,3883	2114	4716	3166,271
feb-1920					0,0638	0,3767							0,0274	0,1111	1111	1111	1111,111
mar-1920					0,4660	1,9667											
apr-1920					0,3634	2,8975											
mag-1920					0,0633	0,1475											
giu-1920					0,0717	0,3120											
lug-1920					0,1919	0,3683											
ago-1920					0,0571	0,1917											
set-1920					0,2002	2,2228											
ott-1920					0,2300	0,9467											
nov-1920					0,3202	2,7688											
dic-																	

ESEMPLIFICATIVO
NON ESAUTIVO

Tabella 1

² La tabella ottenuta, di cui è visibile un estratto, mostra i dati raccolti per quattro stazioni, Boretto, Cremona, Piacenza e Pontelagoscuero. Quelli relativi alle prime due non siano stati poi usati nella successiva analisi e discussione perché non rilevanti rispetto alle serie storiche più lunghe e complete di Piacenza e Pontelagoscuero, peraltro localizzate ai limiti superiore e inferiore del tratto d'interesse.

3.1.1. Portata solida e diverse categorie in cui si divide

La portata solida di un corso d'acqua, naturale o artificiale, è la quantità di materiale solido, misurata in peso, comunque trasportata in un determinato istante dalla corrente dell'acqua fluente. La portata solida si misura in kg/s di materiale trasportato. ovvero, nota la portata liquida, in kg per ogni metro cubo di acqua (torbidità specifica).

Il trasporto solido può essere suddiviso in due categorie principali: trasporto solido al fondo e trasporto solido in sospensione.

Il trasporto solido al fondo è costituito da sedimenti che si muovono sul fondo o a bassa distanza da questo come elementi singoli o come movimento generalizzato di granuli di ogni dimensione. Seppure quasi sempre quantitativamente inferiore rispetto a quello in sospensione, rappresenta una frazione molto importante del trasporto totale perché interamente connessa alle modificazioni morfologiche dell'alveo.

Il trasporto solido in sospensione è invece costituito da particelle sollevate dal fondo e tenute in sospensione dalla turbolenza della corrente; costituisce tendenzialmente la frazione maggiore del trasporto solido totale ed è a sua volta suddivisibile in due classi: “wash load” (trasporto per dilavamento) e trasporto in sospensione in senso stretto.

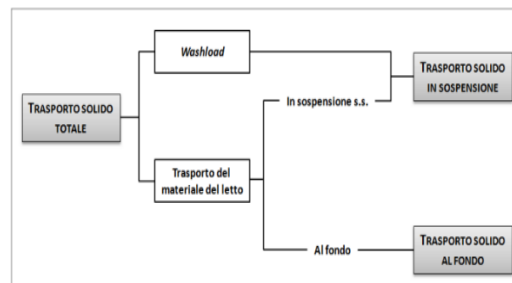


Figura 6-tipologie di trasporto solido

Il primo rappresenta la porzione più fine del trasporto in sospensione (diametro inferiore a 0.064 mm, cioè a partire dal limo), che ha origine dai versanti durante un periodo piovoso e si muove direttamente fino alle zone di sedimentazione (laghi, mari, ...), senza entrare a far parte del materiale del letto; il trasporto in sospensione in s.s. invece può essere sedimentato nell'alveo stesso in zone o periodi di minore capacità di trasporto della corrente.

Le variabili selezionate descrittive del “wash material” di nostro interesse sono: trasporto torbido e torbidità (definiti negli annali come peso del materiale solido in sospensione che ha attraversato la sezione nell'intervallo (in tonn); e quoziente fra il valore della portata torbida e quello della portata liquida relativi a quella sezione e istante (in kg/m³)).

3.2. Dati sulla composizione del sedimento bloccato dietro i pennelli fluviali³

È stata valutata l'estensione areale dei canali secondari collocati dietro ai pennelli che, a cavallo fra gli anni '60 e gli anni '80, disattivandosi sono evoluti in superfici esterne all'alveo attivo come visibile nella *Figura 7* (es. terrazzi). Usando le sezioni topografiche storiche disponibili per il Fiume Po (misurate con frequenza circa decennale fra il 1954 e il 2005) è stato calcolato lo spessore medio dei riempimenti sedimentari ed è stato quindi possibile determinare il volume di tali depositi che si attesta attorno a 100 Mm³.

In corrispondenza di alcuni di questi riempimenti sono stati in seguito eseguiti dei carotaggi a mano (profondità massime di 3-4 m) per verificarne la composizione granulometrica. Circa il 50% di tali materiali è costituito da limi e argille, mentre la restante metà ricade nel campo delle sabbie prevalentemente medie.

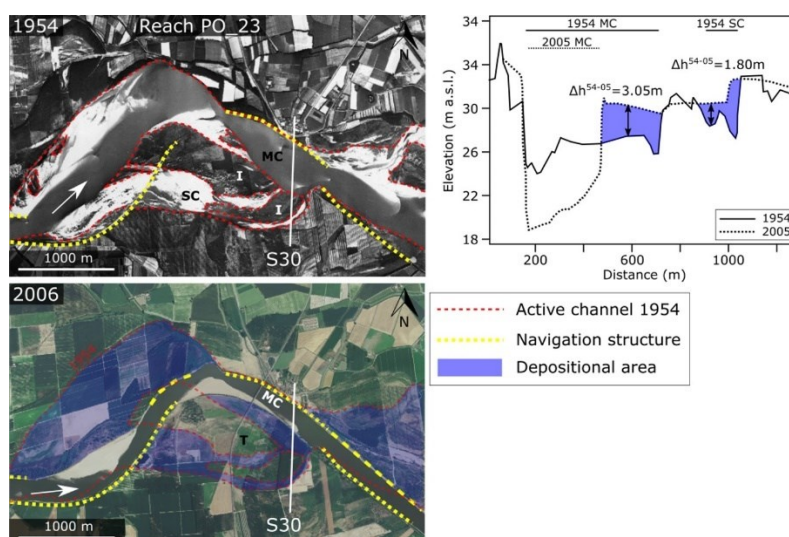


Figura 7-Figura esemplificativa dell'evoluzione della configurazione altimetrica di canale principale e canali secondari del Po

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1. Grafici elaborati dai dati

I grafici riportati nella presente sezione sono risultati dall'elaborazione dei dati raccolti per ogni stazione e mese dal 1916 al 2021 di: portata liquida media (m³/s), portata liquida massima (m³/s), torbidità media (kg/m³), torbidità massima (kg/m³) e trasporto torbido (10³ tonn) (vedi *Tabella 1*).

³ Le procedure, risultati, e immagini riportati sono frutto dell'attività di ricerca in corso presso il Dipartimento di Geoscienze (dott. Andrea Brenna)

Tutti i grafici rappresentati sono stati costruiti con la totalità dei dati senza eliminazioni di eventuali outliers (potenzialmente rappresentativi di eventi importanti per il corso fluviale), ma hanno assi accorciati per permettere maggiore leggibilità dei dati, parte dei quali non è quindi rappresentata.

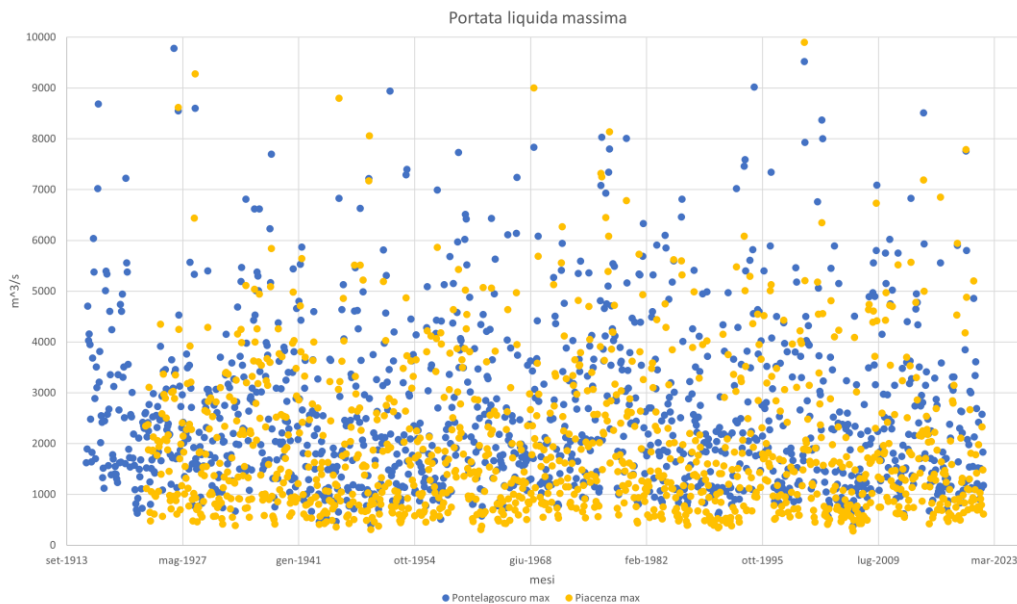


Grafico 1-portate liquide massime a Piacenza e Pontelagoscuro relativamente dal 1923 e 1916

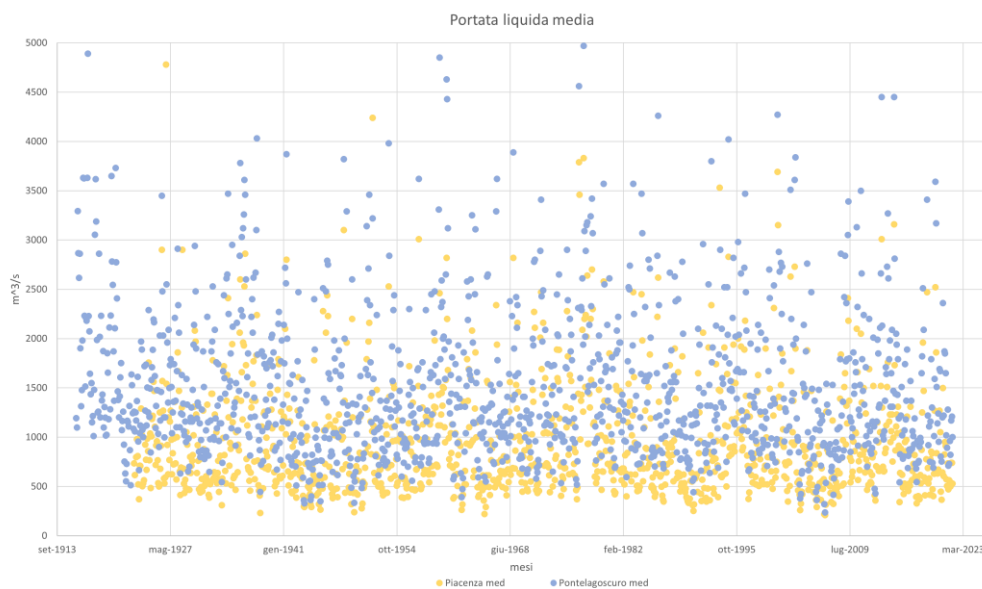


Grafico 2-portate liquide medie a Piacenza e Pontelagoscuro rispettivamente dal 1923 e 1916

Il Grafico 1 e il Grafico 2, sono grafici di dispersione che riportano l'evoluzione delle portate liquide nell'arco di tempo considerato alle due stazioni, ed evidenziano come non ci siano state specifiche tendenze a un cambiamento nei valori di questa variabile.

La diminuzione generale di sedimenti in sospensione già dimostrata dalla letteratura non è quindi riconducibile a altrettanto chiara diminuzione del fluido che li trasporta.

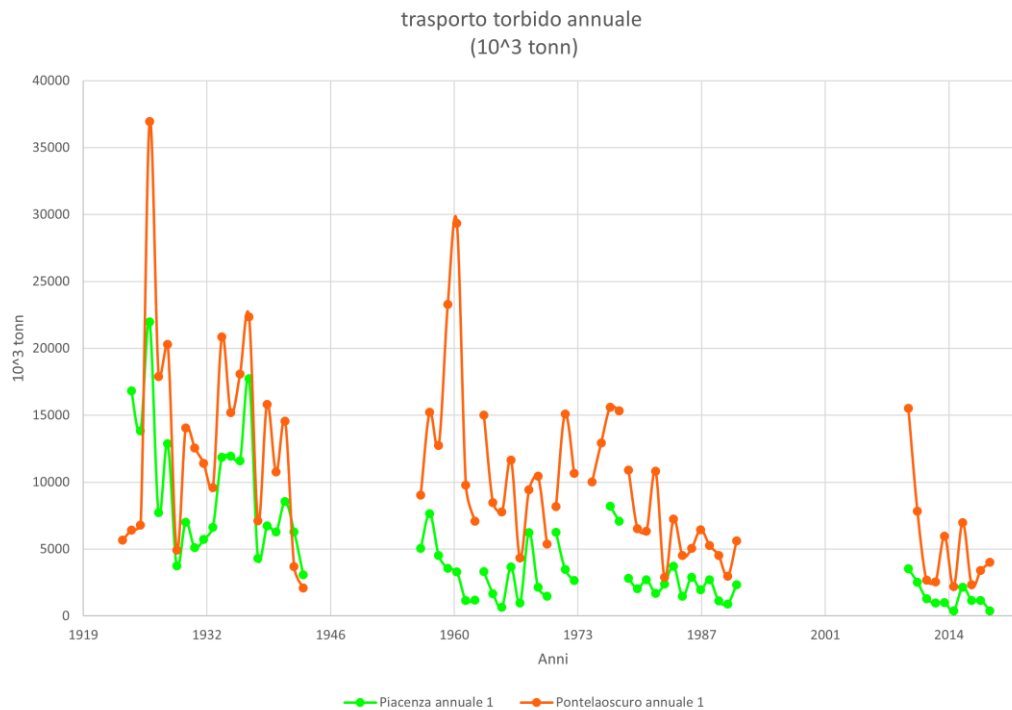


Grafico 3-andamento annuale del trasporto torbido (in 10^3 tonn) dal 1924 al 2019 alle stazioni di Piacenza e Pontelagoscuro

Nel *Grafico 3* dell'evoluzione annuale del trasporto in sospensione è invece evidente la generale diminuzione dei valori che questo assume.

Si può anche notare una differenza importante tra i valori e gli andamenti assunti alle due stazioni negli anni tra il 1956 e il 1970 circa (secondo tratto in cui riiniziano le curve dopo il gap dato dalla mancanza dei dati successivi al 1943), in un contesto generale di valori che seguono invece andamenti meno distanti e più sovrapponibili.

Bisogna tenere presente che il trasporto torbido in tonnellate è tuttavia influenzato dalla portata liquida alle due stazioni che, drenando aree di diverse dimensioni del bacino, saranno sicuramente diverse. Un confronto diretto non è quindi ben esplicativo di eventuali differenze nei processi di trasporto.

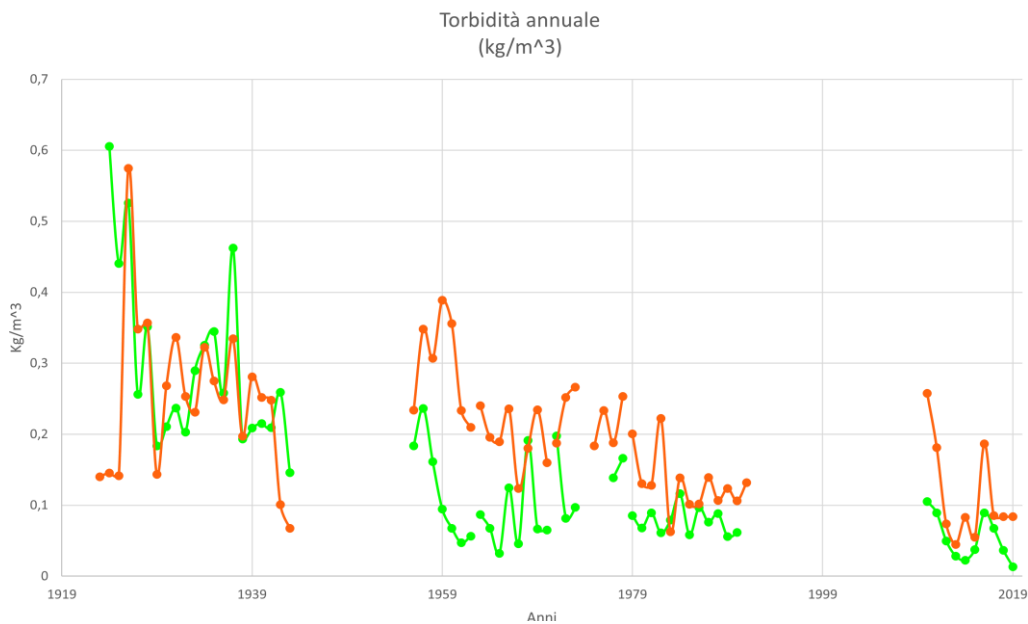


Grafico 4-andamento annuale della torbidità (in kg/m³) dal 1924 al 2019 alle stazioni di Piacenza e Pontelagoscuro

Il *Grafico 4* dell'andamento annuale della torbidità, oltre a evidenziare ulteriormente il trend generale di diminuzione del trasporto di sedimenti fini in sospensione negli anni, rende ulteriormente significativa e chiara la differenza già segnalata negli anni subito successivi al 1956.

Essendo la torbidità una concentrazione, è indipendente dalla portata liquida, e permette quindi un confronto più diretto delle curve. Ancora più importanza assume in quest'ottica l'anomala differenza presente nel periodo indicato, dovuta quindi necessariamente a una differenza nel quantitativo di sedimento fine in sospensione trasportato alle due stazioni per ogni m³ di acqua.

Spicca quindi questa differenza e l'importante decrescita dei valori di torbidità a Pontelagoscuro in un periodo di quasi stabilità per Piacenza, che ci dice che la diminuzione alla stazione a valle non è riconducibile in questo tratto semplicemente al trend generale di diminuzione costantemente presente dagli anni '20.

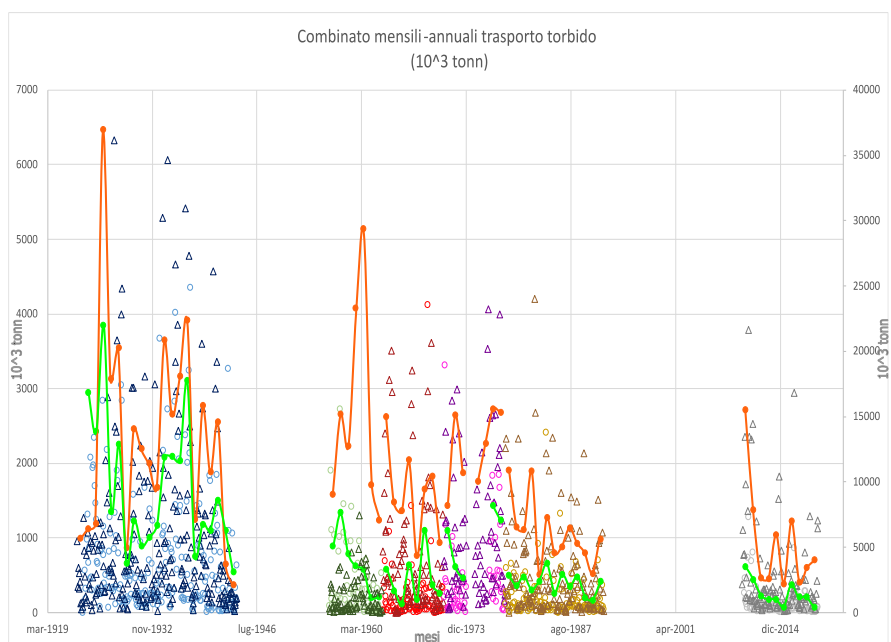


Grafico 5-combinazione tra la rappresentazione grafica dei dati annuali e dei dati mensili di trasporto torbido

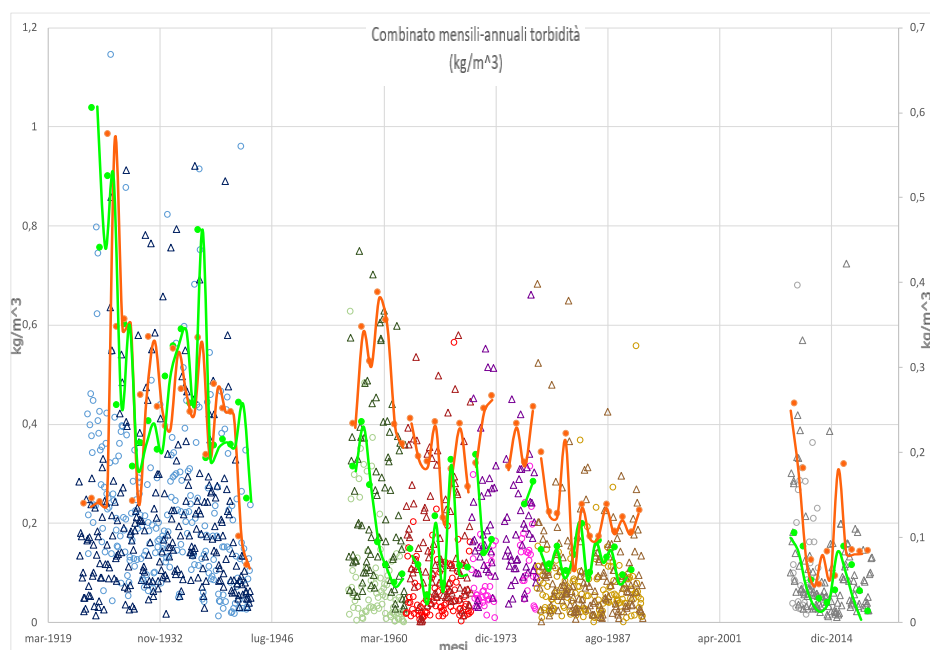


Grafico 6- combinazione tra la rappresentazione grafica dei dati annuali e dei dati mensili di torbidità

Il Grafico 5 e il Grafico 6, sono grafici “di transizione” costruiti attraverso la combinazione della rappresentazione dei dati annuali e di quelli mensili per permettere di identificare dei macroperiodi in cui dividere l’analisi.

Si è quindi individuato, grazie al confronto tra le due diverse serie di dati e la rappresentazione e analisi di entrambe le variabili, 6 diversi periodi in cui dividere l’analisi successiva.

Sono stati identificati i principali trend nei due grafici e separate zone in cui si avevano importante inversione della tendenza o gap di dati mancanti.

Questo è stato necessario per poter visualizzare gli andamenti delle curve (attraverso regressioni vere e proprie (vedi *Grafico 7* e *Grafico 8*) senza che grandi periodi di dati mancanti o l'esagerata lunghezza e conseguente variabilità di alcuni annullassero la leggibilità del grafico e delle tendenze in esso.

I macroperiodi identificati sono stati:

1923-1943; 2. 1956-1962; 3. 1963-1970; 4. 1971-1978; 5. 1979-1991; 6. 2010-2019

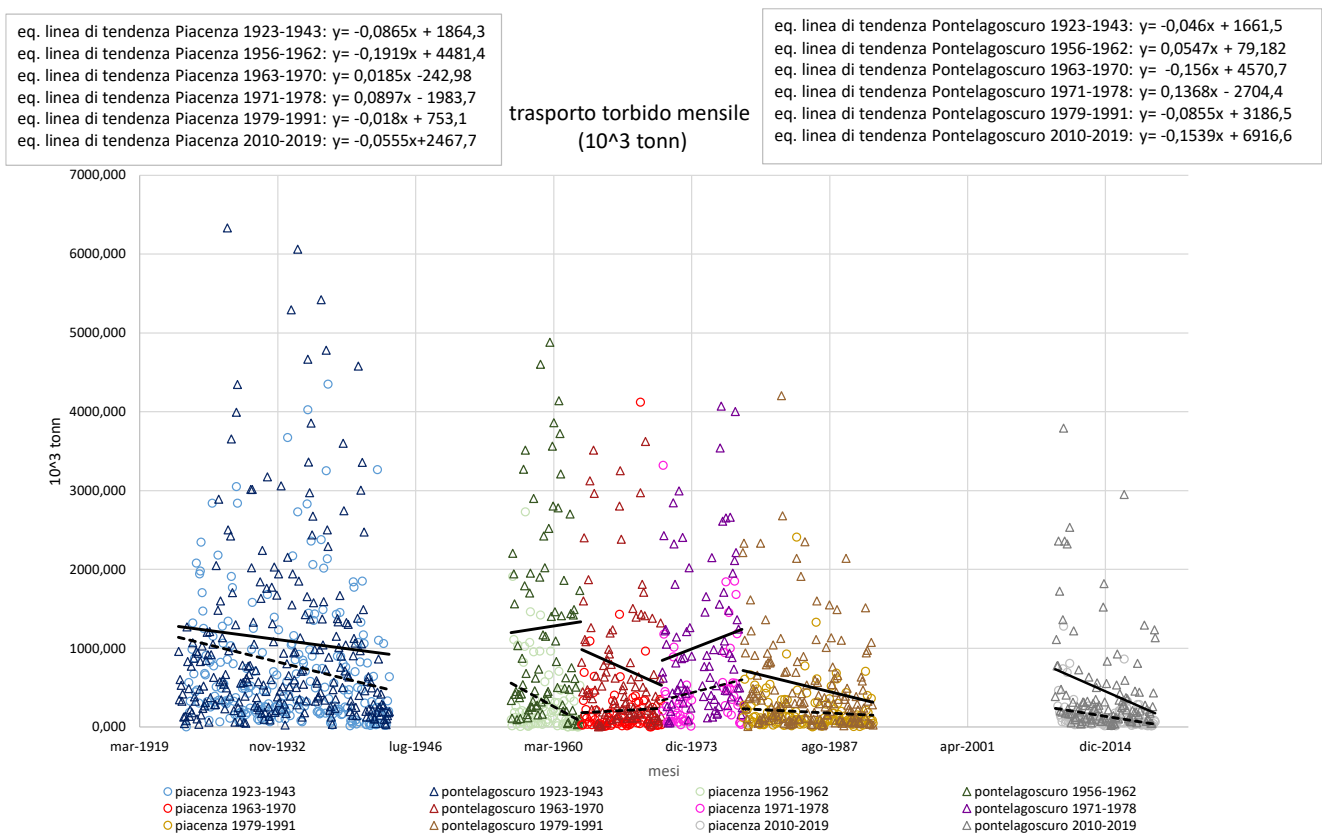


Grafico 7-dati mensili di trasporto torbido mensile organizzati nei 6 macroperiodi individuati precedentemente con le relative linee di tendenza (costruite attraverso regressioni lineari)

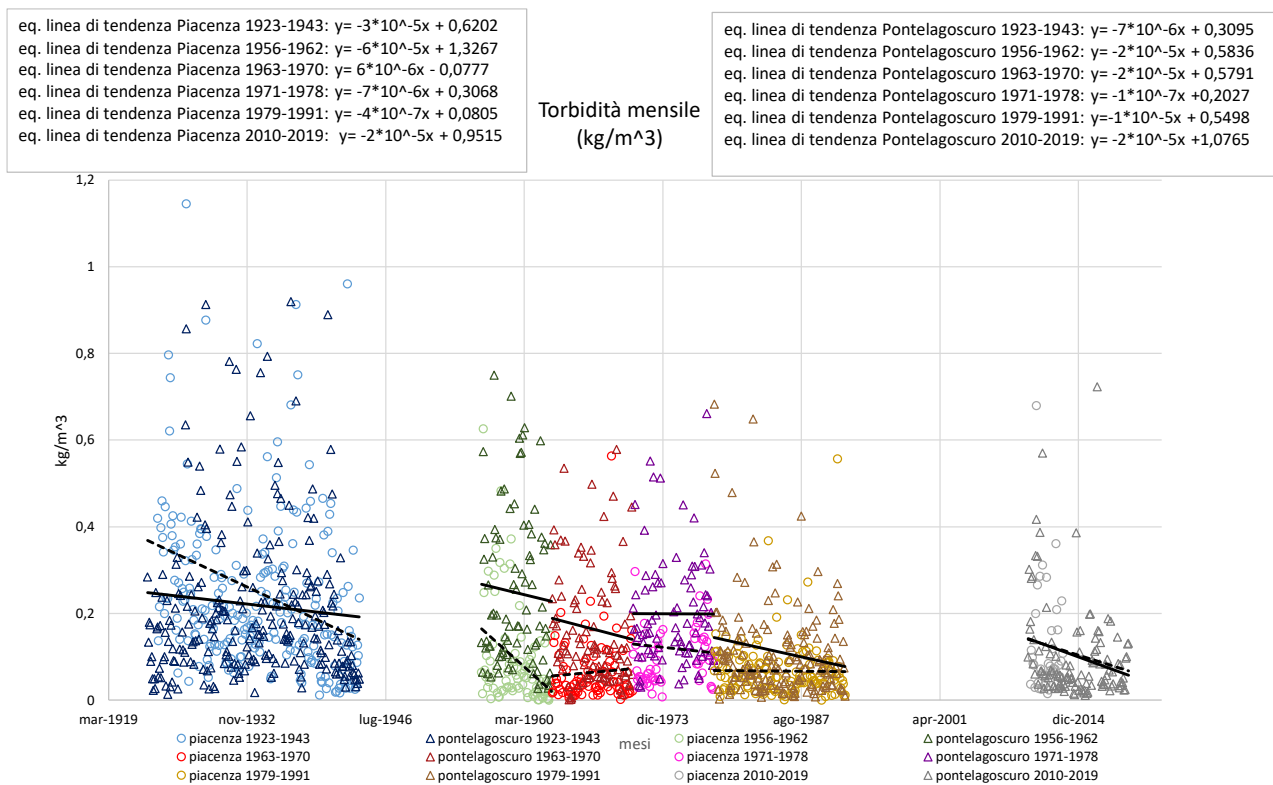


Grafico 8-dati mensili di torbidità nei 6 macroperiodi con relative linee di tendenza (costruite attraverso regressioni lineari)

Il Grafico 7 e il Grafico 8 rappresentano i dati mensili rispettivamente di trasporto torbido e torbidità, sono stati centrali nella nostra analisi.

La linea tratteggiata indica le tendenze alla stazione di Piacenza, mentre quella continua quelle alla stazione di Pontelagoscuro.

In entrambi è visibile il trend di diminuzione generale dagli anni '20 ad oggi e, grazie alla divisione in macroperiodi, come sia variata nel tempo l'intensità dei processi in questo contesto di decrescita. Come per i grafici precedenti molto significativa nell'ottica di un confronto tra le stazioni, è la variabile torbidità (Grafico 8), in quanto rappresentativa di una concentrazione che ci permette di distinguere la diminuzione del peso trasportato da capacità di trasporto e quantitativo di sedimenti fini per m³ di fluido. Nel periodo 2 ad esempio (1956-62), il decremento di sedimenti fini trasportati a parità di quantitativo di fluido sta continuando a diminuire nonostante a livello di peso di trasporto solido in sospensione il valore stia addirittura aumentando (probabilmente quindi unicamente per un aumento di portata liquida).

Nell'ambito comunque di una generale decrescita della torbidità si può nuovamente riconoscere la differenza tra le due stazioni nel periodo 1963-70 dove alla stazione di Pontelagoscuro si vede una diminuzione rilevante, mentre alla stazione di Piacenza vi è addirittura un leggero aumento. Questo andamento opposto assume quindi ulteriore rilevanza.

Segue un'analisi specifica per periodi del Grafico 8.

4.2. Discussione e analisi di tendenze ed ipotesi

Considerando la premessa (già introdotta) dell'influenzabilità del trasporto torbido da parte dell'idrologia (es. diminuzioni dovute a un calo del deflusso liquido che mantenendo la propria capacità di trasporto ma riducendosi può far decrescere i sedimenti in sospensione senza che ci sia stata una variazione della loro disponibilità), l'analisi seguente sarà incentrata sulla torbidità in quanto concentrazione ottenuta dividendo il quantitativo di sedimenti in sospensione per i m³ di fluido da cui sono trasportati.

Analizzando le regressioni costruire nel *Grafico 8* vediamo che la generale diminuzione nel tempo del trasporto solido non è determinata da un calo della portata liquida, ma è dovuta a una vera e propria decrescita del quantitativo di sedimenti in sospensione disponibili.

Un'analisi dei vari periodi del *Grafico 8* ci permette di osservare:

- Nel primo (1923-43) e nel secondo (1956-62) un'iniziale forte diminuzione della torbidità come conseguenza del periodo di maggiore impatto e sfruttamento da parte dell'uomo. Questa decrescita è decisamente più marcata a Piacenza;
- Nel terzo periodo (1963-70) un'anomalia importante negli andamenti del trasporto: mentre infatti è evidente l'inizio di un periodo di maggiore stabilità a Piacenza che vede rallentare la diminuzione del trasporto in sospensione che era stata causata (la linea di tendenza a questa stazione vede addirittura una lieve risalita nella torbidità), a Pontelagoscuro è visibile un tasso di diminuzione rilevante.

Nelle due stazioni quindi la differenza è sostanziale, gli andamenti vanno in direzioni opposte.

- Nel quarto (1971-78) e nel quinto periodo (1979-91) l'andamento torna a essere simile tra le due stazioni, rimanendo in leggera diminuzione.
- Nell'ultimo periodo (2010-2019) i due andamenti arrivano a sovrapporsi, ma è tuttavia visibile un nuovo anomalo calo estremamente importante e veloce dei valori di torbidità.

Il più accentuato decremento della torbidità a Piacenza nei primi periodi è legato a una risposta progressiva (e non immediata e omogenea) del corso fluviale dovuta a una serie di processi di tamponamento nei primi decenni che hanno ritardato gli effetti degli impatti a Pontelagoscuro essendo questo più a valle. Nonostante infatti gli interventi siano attuati lungo tutto il bacino imbrifero si può supporre che le risposte alla perturbazione e la ricerca di mantenimento dell'equilibrio abbiano dato inizialmente una diminuzione più lenta del trasporto a valle.

Le anomalie riscontrate invece nel terzo e nell'ultimo periodo sono più complesse da spiegare e per questo elaborate nelle sezioni successive; la prima comunque sembra fornire conferme riguardo la fondatezza dell'ipotesi di intrappolamento dei sedimenti fini da parte dei pennelli fluviali, mentre la seconda si può supporre rifletta impatti derivanti dal rimboschimento.

4.2.1. Ipotesi sulle motivazioni della differenza tra le stazioni di Piacenza e Pontelagoscuro nel periodo 1963-1970 e verifica

L'importante ed evidente differenza riscontrata nel terzo periodo (1963-1970; si veda *Grafico 8*) tra la stazione di Piacenza e quella di Pontelagoscuro è stata centrale per avvalorare l'attendibilità dell'ipotesi iniziale.

L'opposto andamento delle due linee assume infatti senso se interpretato come frutto dell'impatto delle opere di canalizzazione.

Considerando il periodo in cui sono stati costruiti i pennelli (anni '50), vediamo che il trasporto assume caratteristiche diverse tra la stazione a monte e a valle dell'area in cui si trovano proprio nel periodo in cui si può supporre che questi abbiano massimo impatto e costituiscano una differenza sostanziale tra i bacini drenati dalle due stazioni.

Per riassumere: a Piacenza l'andamento (che vede addirittura un leggero aumento) è giustificato dalla prosecuzione del processo già iniziato precedentemente di recupero dell'equilibrio e stabilizzazione del trasporto torbido; mentre a Pontelagoscuro il decremento è causato dall'intrappolamento da parte dei pennelli proprio di sedimento fine che causa una diminuzione importante del trasporto solido in sospensione, poiché parte di ciò che arrivava dal bacino drenato viene bloccato.

Per verificare l'affidabilità dell'ipotesi che vede i pennelli come causa specifica di questa riduzione abbiamo deciso di proseguire nell'analisi con un controllo matematico della corrispondenza tra il quantitativo di sedimenti fluviali bloccati dietro i pennelli e la diminuzione della portata torbida nel periodo analizzato.

Dopo aver quindi tracciato una nuova linea di regressione (*Grafico 9*) per il grafico di trasporto torbido mensile a Pontelagoscuro che prendesse in considerazione i 15 anni in cui è verosimile che si sia protratto l'effetto della costruzione dei pennelli (prima del riempimento completo dei canali da essi "protetti") abbiamo calcolato l'integrale della retta ottenuta.

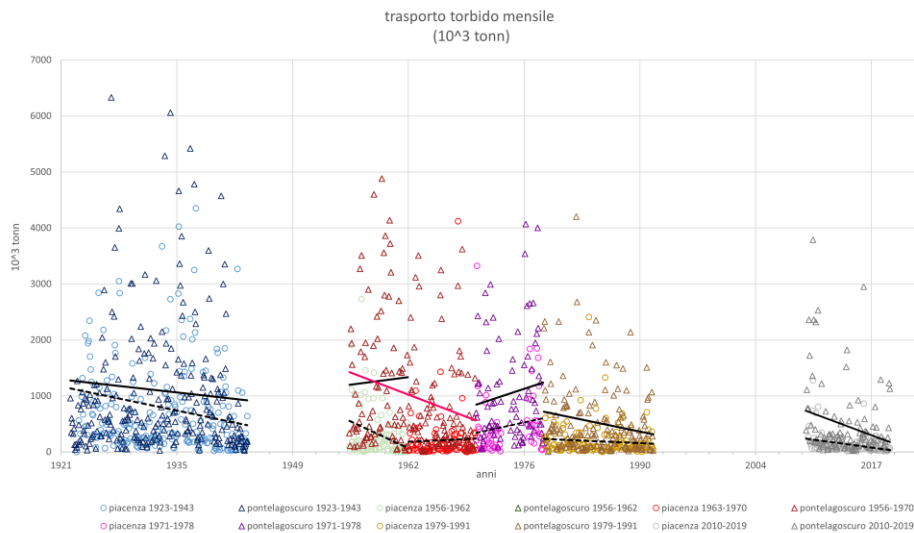


Grafico 9- trasporto torbido mensile diviso in periodi con relative linee di pendenza, tra cui una linea di regressione specifica indicata in rosso e costruita sul periodo d'impatto dei pennelli

L'integrale ci permette di ottenere la differenza tra quello che sarebbe stato il trasporto se fosse rimasto costante e non avesse subito influenze esterne e quello che è invece stato il flusso reale considerata la progressiva diminuzione causata dall'intrappolamento di cui detto.

Questa verifica può essere fatta calcolando la differenza mese per mese tra il trasporto ideale indisturbato e quello reale, oppure direttamente la differenza tra il trasporto annuale iniziale prima dell'impatto (1956) e quello alla fine del periodo di impatto (1970). Il calcolo è stato svolto in entrambi i modi per un controllo incrociato, ma viene esplicitato di seguito solo il primo con un esempio per facilitarne la comprensione:

1. Calcolo del valore del trasporto torbido in 10^3 tonnellate grazie all'equazione della linea di tendenza inserendo come valore della variabile x il n° giorni (questa variabile permette di considerare anche eventuali anni bisestili).
2. Calcolo la differenza tra il valore iniziale a gennaio 1956 e il valore reale mese per mese di apporto di sedimenti in sospensione.

Se ad esempio il valore a gennaio del 1956 è di 1424,117, a febbraio è di 1419,225, e a marzo è 1414,649,...

$$1424,117 - 1419,225 = 4,892 \quad ; \quad 1424,117 - 1414,649 = 9,468 \quad ; \quad \dots$$

3. Somma dei valori ottenuti per ogni mese di diminuzione del trasporto solido in sospensione. Il valore risultante, indicativo della diminuzione in tonnellate del sedimento fine in sospensione nei quindici anni, è di circa $7,74 * 10^7$ tonn

4. *Trasformazione del valore del quantitativo di sedimenti fluviali bloccati nei canali secondari protetti dai pennelli fluviali da m³ a tonnellate sapendo che la densità adatta per limi e limi sabbiosi umidi è 1,9 tonn/m³*

$$100.000.000 \text{ m}^3 * 1,9 \frac{\text{tonn}}{\text{m}^3} = 1,9 * 10^8 \text{ tonn}$$

5. *Confronto del valore dei sedimenti bloccati con quello della diminuzione del trasporto.*

Poiché delle circa 190 milioni di tonnellate di sedimento che si è stimato essere presente bloccato dietro ai pennelli, una percentuale compresa tra il 40 e il 60% è sabbia, il paragone sembra confermare che la diminuzione di sedimento trasportato sia frutto dell'intrappolamento, poiché con una percentuale di sedimento fine verosimilmente presente dietro le opere di navigazione pari a circa il 50% delle totali 190 milioni di tonn, otteniamo due numeri (95 mln di tonn di sedimenti bloccati e 77 mln tonn di sedimenti trasportati in meno) simili e con ordini di grandezza comparabili.

Grazie alla regressione lineare costruita è stato poi fatto un ulteriore calcolo per stimare la capacità di filtrazione dei pennelli e comprendere meglio il processo. Sapendo che c'è stata una diminuzione di circa 77 milioni di tonnellate nel trasporto in quindici anni, si può calcolare il rapporto tra la diminuzione media annuale, pari a circa $5,2 * 10^6$ tonn, e il valore di trasporto torbido medio annuale pari a circa $1,2 * 10^7$ tonn. Moltiplicando il valore per 100 otteniamo una percentuale indicativa dell'efficacia di filtrazione pari al:

$$\frac{5.157.892,88}{11.931.506,82} * 100 = 43,23\%$$

I calcoli eseguiti e i valori trovati sostengono quindi la supposizione di un ruolo fondamentale delle opere di canalizzazione nell'incisione e semplificazione della struttura morfologica dell'alveo, considerando il notevole l'intrappolamento dei pennelli e conseguente aumento di potenza e l'effetto diretto di restringimento dell'alveo per il riempimento dei canali.

4.2.2. Ipotesi sulle motivazioni della rinnovata forte diminuzione della torbidità nel più recente periodo 2010-2019

Per quanto riguarda l'anomalo rinnovo di una diminuzione importante del sedimento in sospensione nel più recente periodo a entrambe le stazioni (vedi *Grafico 7 e Grafico 8*), può essere più complesso selezionare una causa specifica in un panorama ampio di possibili fattori antropici le variazioni del trasporto. È credibile tuttavia ipotizzare che esso sia fortemente connesso all'importante abbandono delle aree marginali e conseguente riforestazione in Italia, la cui correlazione (già introdotta precedentemente) con una diminuzione di sedimenti è stata ampiamente dimostrata.

Nella penisola in generale infatti, nel più recente periodo storico, molte aree un tempo coltivate e quindi tipicamente caratterizzate da piante provviste di radici poco sviluppate e periodo di vita breve, sono state sostituite con aree forestali con piante tipicamente dotate d'importante apparato radicale in grado di influire sulla disponibilità di sedimento. Questo ha probabilmente fatto sì che venisse stabilizzata la struttura di grandi porzioni di terreno rese meno disponibili a erosione e trascinamento da parte delle acque.

Nonostante i dati a riguardo siano disponibili solo a livello dell'intero sistema italiano (vedi *Figura 8* e *Figura 9*), la consapevolezza che oggi circa il 40% del territorio è coperto da aree forestate e per la prima volta nella storia italiana queste sono in percentuale maggiore di quelle ad uso agricolo (25) suggerisce come detto da Billi e Spalevic (4) che l'aumento della copertura forestale possa essere un ulteriore e importante fattore responsabile della riduzione della portata solida nei fiumi italiani.

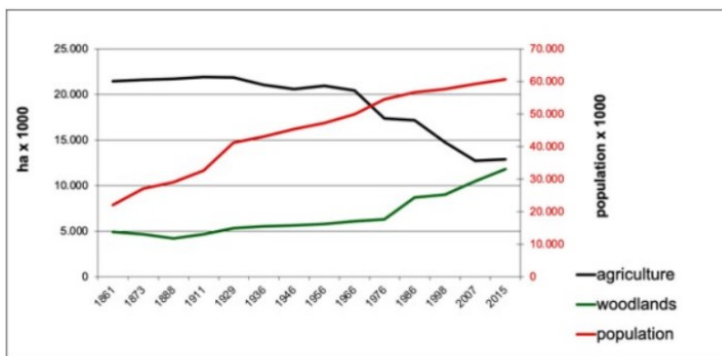


Figura 9-Dinamiche di aree forestali, agricole e della popolazione in Italia tra il 1861 e il 2015 (26)

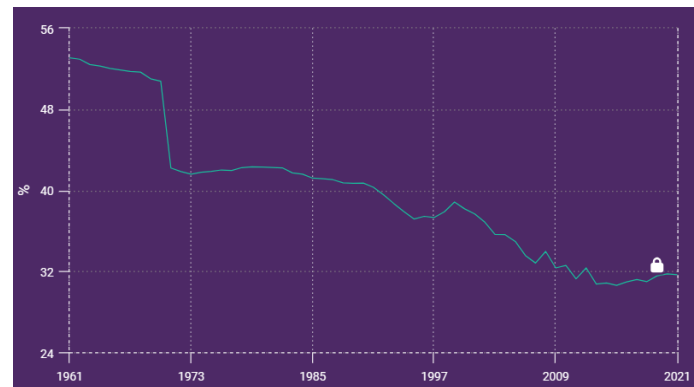


Figura 8-andamento della percentuale di terreno arabile e coltivabile in Italia (28)

5. CONCLUSIONE

La serie storica dei dati e la ricostruzione della traiettoria evolutiva del trasporto torbido nel tempo per il settore analizzato sembrano confermare, attraverso i range di valori ottenuti con le verifiche numeriche, l'ipotesi che le opere di navigazione effettuate sul Po siano una delle cause della diminuzione del trasporto in sospensione rilevata dal 1919 e che abbiano avuto un rilevante impatto. È stata quindi supportata con un'ampia analisi dei dati la fondatezza dell'assunto iniziale riguardo la capacità, non considerata precedentemente, di queste opere di intrappolare grandi quantità di sedimenti fin componenti il washload.

Si è anche visto come l'intrappolamento possa avere un ruolo morfogenetico importante attraverso l'innalzamento della quota del fondo dei canali secondari e la loro trasformazione in superfici di terrazzo che ha l'effetto di concentrare la portata liquida e restringere l'alveo fluviale creando un aumento di energia che contribuisce alla sua incisione.

Tra i risultati dell'analisi vi è anche l'evidenza di un rinnovamento nella diminuzione del sedimento fine nel periodo più recente (dopo un periodo di maggiore stabilità) apparentemente ricollegabile, ancorché sulla base di dati disponibili solo a livello italiano e quindi non specifici della zona di nostro interesse, all'abbandono delle zone marginali e conseguente aumento della copertura forestale.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- (1) SEAR D.A., NEWSON M.D., THORNE C.R. (2003). Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology. Defra/Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme, R&D Technical Report FD1914, 233 pp.
- (2) WOHL E.E. et al. (2013). Fluvial geomorphology Vol. 9. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, 1–843 pp.
- (3) SURIAN N., RINALDI M. (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50 (4), 307-326.
- (4) Billi, P. & Spalevic, V. (2022) Suspended sediment yield in Italian rivers. *Catena*, 212, 106119.
- (5) Brenna, A., Bizzi, S., Surian, N., 2022. A width-based approach to estimating historical changes in coarse sediment fluxes at river reach and network scales. *Earth Surf. Proc. Land*.
- (6) Rinaldi M., Surian N., Comiti F., Bussetini M. (2016). IDRAIM – Sistema di valutazione idromorfologica, analisi e monitoraggio dei corsi d’acqua – Versione aggiornata 2016 – ISPRA – Manuali e Linee Guida 131/2016. Roma, gennaio 2016. (In Italian)
- (7) SURIAN N., RINALDI M., PELLEGRINI L., AUDISIO C., MARAGA F., TERUGGI L., TURITTO O., ZILIANI L. (2009). Channel adjustments in northern and central Italy over the last 200 years. In: James L.A., Rathburn S.L., Whittecar G.R. (Eds.), *Management and Restoration of Fluvial Systems with Broad Historical Changes and Human Impacts*, Geological Society of America Special Paper 451, 83-95.
- (8) Church, M., 2006. Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 34, 325–354.
- (9) Brenna A., Bizzi S., Surian N., 2024. How multiple anthropic pressures may lead to unplanned channel patterns: Insights from the evolutionary trajectory of the Po River (Italy). *Catena*, 234, 107598.
- (10) Blazejewski, R., Pilarczyk, K.W., Przedwojski, B., 1995. *River training techniques: fundamentals, design and applications*. CRC Press.
- (11) MACKIN J.H. (1948). Concept of the graded river. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 59, 463-512.
- (12) SCHUMM S.A., LICHTY R.W. (1965). Time, space and casuality in geomorphology. *American Journal of Science*, 263, 110-119.
- (13) LANE E.W. (1955). Design of stable channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 120, 1-34.
- (14) SCHUMM S.A. (1977). *The Fluvial System*. Wiley, New York, 338 pp.
- (15) BULL W.B. (1979). Threshold of critical power in streams. *Geological Society of America Bulletin*, 90, 453-464.

- (16) COSTA J.E. (1975). Effects of agriculture on erosion and sedimentation in Piedmont province, Maryland. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 86, 1281-1286.
- (17) KNOX J.C. (1977). Human impacts on Wisconsin stream channels. *Annals of the Association of American Geographers*, 67, 323-342.
- (18) Zanchettin, D., Traverso, P., Tomasino, M., 2008. Po River discharges: a preliminary analysis of a 200-year time series. *Clim. Change* 89 (3), 411–433.
- (19) Montanari, A., 2012. Hydrology of the Po River: looking for changing patterns in river discharge. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (10), 3739–3747.
- (20) Colombo, A. & Filippi, F. (2010) La conoscenza delle forme e dei processi fluviali per la gestione dell'assetto morfologico del fiume Po. *Biologia Ambientale*, 24(1), 331–348. (In Italian)
- (21) (Gorio, O., 1954. Ventidue anni di studi e lavori sul Po dal 1919 al 1941. *Cartotecnica Romana*, Roma (Italy). In Italian.
- (22) Lanzoni, S., 2012. (2012) Evoluzione morfologica recente dell'asta principale del Po. *Giornata Mondiale dell'Acqua*, marzo, Accademia Nazionale dei Lincei, Atti dei Convegni Lincei. In Italian).
- (23) Rinaldi, M., 2021. Bed-level adjustments in the Po River catchment (Northern Italy). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* 2, 41–50.
- (24) Bizzi, S., Piegay, H., Demarchi, L., Van de Bund, W., Weissteiner, C.J., Gob, F., 2019. LiDAR-based fluvial remote sensing to assess 50–100-year human-driven channel changes at a regional level: The case of the Piedmont Region. *Italy. Earth Surface Processes and Landforms* 44 (2), 471–489.
- (25) Marchetti, M., Motta, R., Pettenella, D., Sallustio, L., Vacchiano, G., 2018. Le foreste e il sistema foresta-legno in Italia: verso una nuova strategia per rispondere alle sfide interne e globali. *Forest@* 15, 41–50.
- (26) Agnoletti M., Piras F., Venturi M., Santoro A., 2022. Cultural values and forest dynamics: The Italian forests in the last 150 years. In: *Forest Ecology and Management*, vol. 503. Elsevier
- (27) <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/meteo/report-meteo/annali-idrologici>
- (28) [Global Economic Data, Indicators, Charts & Forecasts | CEIC \(ceicdata.com\)](https://data.ceicdata.com/), source: Organisation for Economic CO-operation and Development.