

2° Giornata di Studio

Il monitoraggio idrotorbidimetrico dei corsi d'acqua

per la stima dei processi erosivi e il bilancio dei solidi sospesi

8 ottobre 2004

MISURA DEL TRASPORTO SOLIDO DEL FIUME RENO

Prof. Paolo Billi, Dott. Enzo Salemi

Dipartimento di Scienze della Terra – Università di Ferrara

RIASSUNTO

La conoscenza del trasporto dei sedimenti di un corso d'acqua è di rilevante importanza per l'interpretazione della sua dinamica e per la gestione e programmazione degli interventi di sistemazione idraulica dell'asta principale e le coste prospicienti la sua foce.

In questo studio si riportano misure di trasporto di fondo ed in sospensione del Fiume Reno che, a parte il Po, è il maggiore fiume dell'Emilia Romagna, sia per lunghezza (210 km), sia per ampiezza di bacino (4953 Km²).

In rapporto alla dinamica di trasporto dei sedimenti, sono state effettuate quattro campagne di misurazioni, in concomitanza di altrettanti eventi di piena.

Tali misurazioni sono state effettuate al ponte della Bastia, con apposita strumentazione.

Allo stesso tempo, sono state effettuate delle stime sul trasporto solido annuale, tramite formula di Engelund e Hansen (1967), modificata Montefusco (1984), la più adatta per alvei con condizioni e caratteristiche morfologiche e sedimentologiche simili a quelle del Reno.

I risultati ottenuti sono in tendenza con quanto osservato in molti fiumi italiani dal dopoguerra: l'antropizzazione degli alvei, l'escavazione del materiale dal letto e la conversione dei terreni montani da seminativi a boschivi e prati, ha causato una drastica riduzione nella produzione di sedimenti e quindi una diminuzione del trasporto di sabbia al mare di circa 3-4 volte.

Malgrado questo tipo di studio necessiti di un periodo molto più lungo di monitoraggio, il primo anno di misurazioni ha confermato la scarsissima quantità di materiale trasportato al fondo dal F. Reno ed una marcata tendenza alla diminuzione della portata solida di fondo annuale negli ultimi decenni.

INTRODUZIONE

La quantificazione del trasporto solido fluviale (sia al fondo che in sospensione), attraverso misurazioni dirette e trattazioni teorico-sperimentali, è un dato fondamentale per lo studio della dinamica di un alveo e delle spiagge alimentate dal suo delta.

Da un punto di vista pratico le misure dirette non sono di facile realizzazione per i seguenti motivi:

- Tempestività d'intervento in seguito ad un evento di piena.
- Reperibilità di una buona stazione di misura, considerando sia fattori scientifici che prettamente logistici:
 - a) la sezione deve essere non troppo lontana dal mare, per essere rappresentativa di tutto, o quasi, il bacino idrografico, o troppo vicina, da risentire degli effetti della marea;
 - b) le misure vengono effettuate da ponte, e nella maggior parte dei casi, i nostri ponti non si prestano a tale scopo per il traffico automobilistico o per la presenza di parapetti troppo alti, che impediscono la calata degli strumenti.
- La scarsità di misure di trasporto solido in fiumi italiani (Sacconi & Billi, 1987; Lenzi, D'Agostino, Billi & Paris, 2004), e la quasi completa assenza di dati riguardanti il Fiume Reno.

Questo lavoro presenta i primi risultati sul trasporto solido del Fiume Reno, dopo il primo anno d'attività, nell'ambito della convenzione stipulata tra il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara e l'Autorità di Bacino del Fiume Reno.

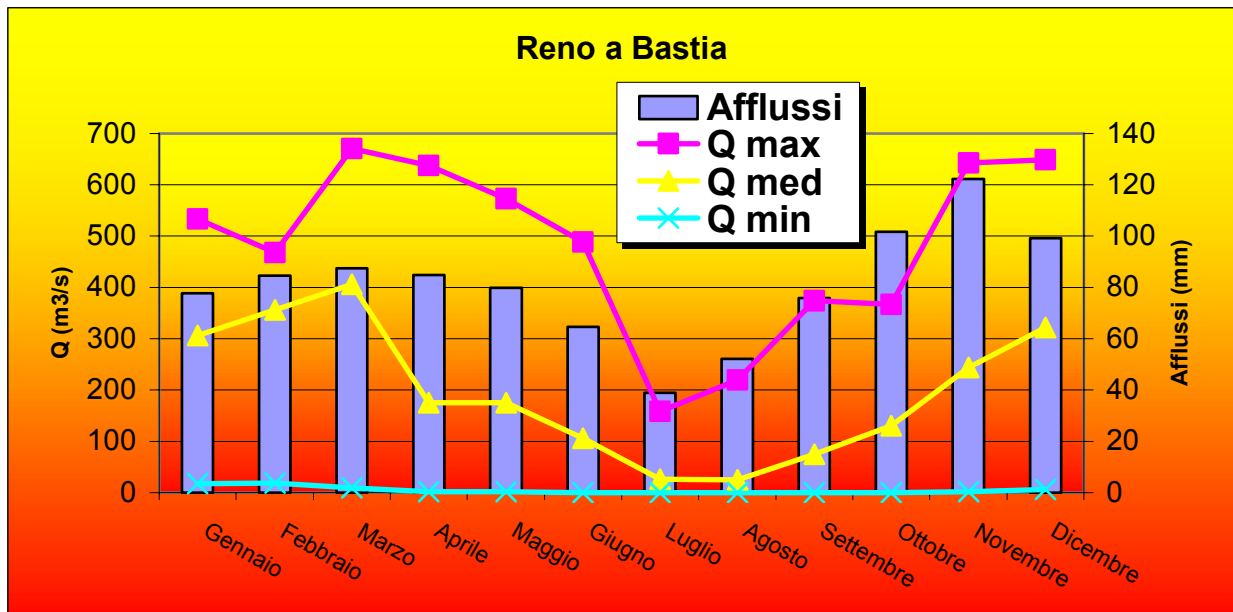


Figura 2 : Precipitazioni e portate medie annuali

Qui in basso sono riportate le stime dei tempi di ritorno delle piene, calcolate con una interpolazione log-normale e con la formula di Gumbel. Grazie a questi dati è possibile stimare anche la portata al “bankfull”, o portata formativa, il cui tempo di ritorno è compreso tra 1.58 e 2.33 anni. I due metodi danno per queste portate valori compresi tra i 300 e i 350 m³/s.

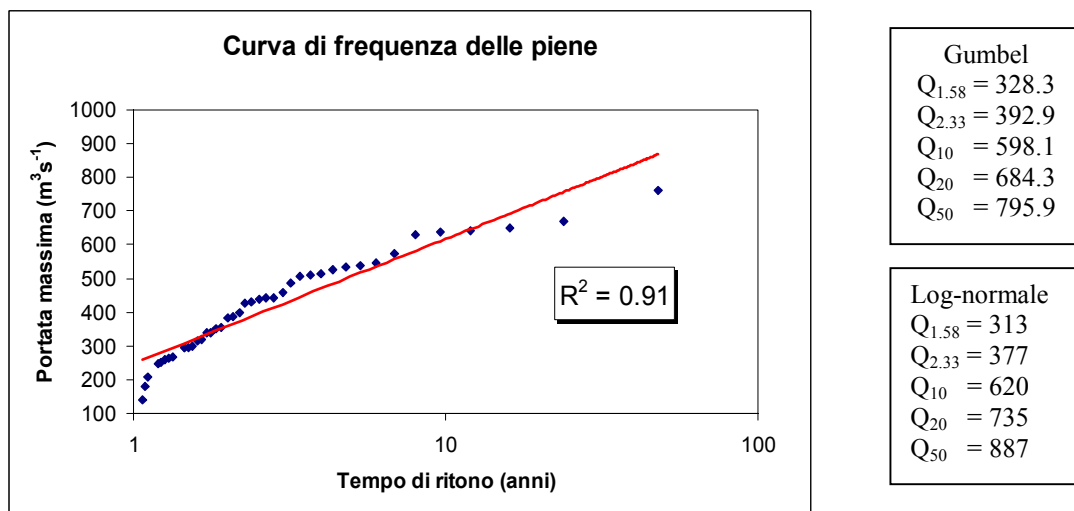


Figura 3 : Tempi di ritorno e portate caratteristiche Fiume Reno

Il ponte di Bastia sottende un bacino di circa 3410 km² e il fiume scorre canalizzato nel suo tratto di pianura.

Gli affluenti di questo tratto sono rappresentati oltre che da corsi d'acqua naturali anche da importanti corsi d'acqua artificiali, canali e scoli, che rivestono un ruolo di primaria importanza sia per l'economia agricola che come recettori di scarichi.

Confluiscono nel Reno i Torrenti Samoggia, Idice, Sillaro, Santerno e Senio e i Canali Navile e Savena abbandonato.

L'area oggetto di studio presenta numerose peculiarità meteo-climatiche, direttamente dipendenti da numerose variabili geografiche e morfologiche che determinano altrettanto numerose differenziazioni sia a meso- che a microscala.

Durante l'inverno si assiste ad un generale dominio dell'anticiclone continentale generalmente centrato sulla Germania, che determina tempo stabile ma frequentemente nebbioso in pianura con diffuse e intense inversioni termiche nell'area padana e clima sostanzialmente asciutto in collina ed in gran parte dell'area montana, eccetto le aree di spartiacque del Reno e del Santerno. Questa ristretta fascia di spartiacque, identificabile a sud della linea Porretta Terme – Firenzuola, è spesso interessata dalle correnti occidentali miti ed umide che investono il più temperato versante tirrenico, così che il tempo è spesso perturbato con frequenti fenomeni di moderata intensità, a prevalente carattere nevoso.

La primavera è stagione d'elevata variabilità meteorologica che determina precipitazioni via via più abbondanti procedendo dalla pianura verso il crinale spartiacque, in maggio possono occasionalmente verificarsi i primi temporali oro-convettivi nell'area alto collinare.

L'estate tende ad essere, in termini di totali meteorici percentuali, proporzionalmente più secca proprio nell'area spartiacque che risente in maniera spiccata dell'influenza tirrenica e manifesta pertanto caratteri mediterranei, pur presentando una frequenza temporalesca notevole.

L'autunno è ovunque la stagione più piovosa, a causa del diretto interessamento del territorio da parte del flusso di correnti occidentali o meridionali che spesso investe la penisola italiana.

2 SCELTA ED UBICAZIONE DELLA SEZIONE DI MISURA

La sezione di misura è stata individuata presso il ponte della Bastia (Fig. 4, 5 e 6), in quanto rappresenta il compromesso migliore tra esigenze logistiche, tecnico-scientifiche e la posizione più a valle possibile. La sezione si trova a monte della confluenza con il Senio ed il Santerno e poco a valle della confluenza con il fiume Idice. In questa prima fase dello studio è stato quindi necessario effettuare delle misure idrauliche e di trasporto solido anche sul Santerno, in modo tale da non escludere il suo apporto.

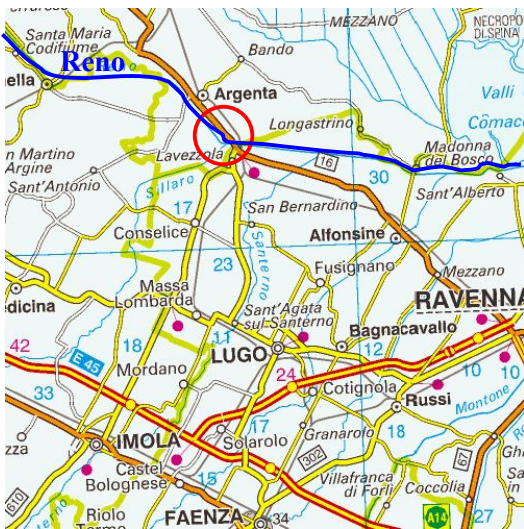
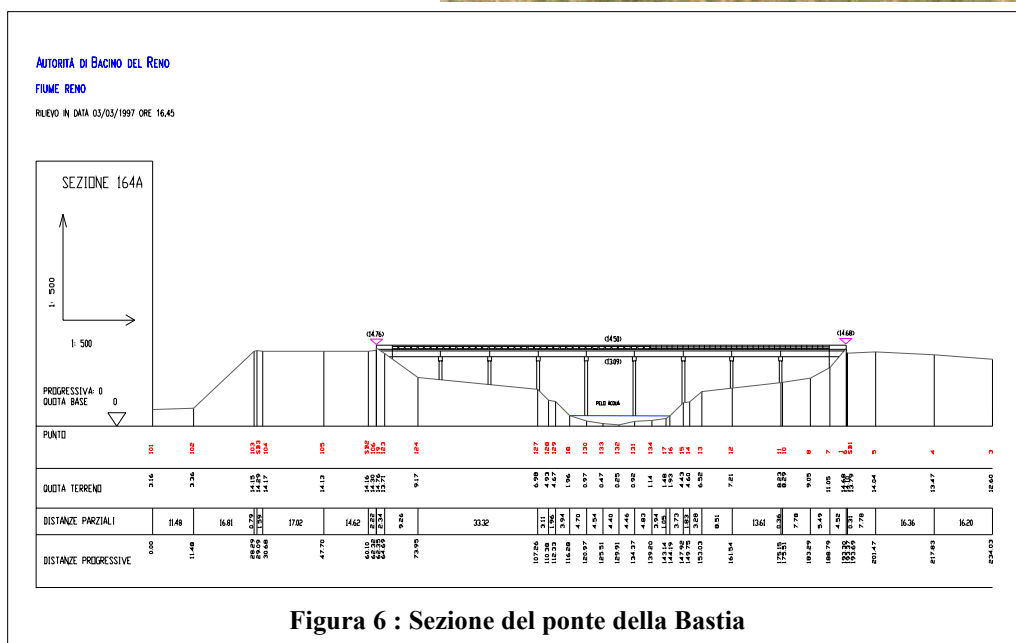


Figura 4 : Località ponte della Bastia



Figura 5 : Ponte della Bastia



3 STRUMENTAZIONE

Per ragioni di omogeneità e confronto con le comunque scarse misure effettuate in altri paesi nel mondo, la strumentazione impiegata è la stessa utilizzata dal Servizio Geologico Americano (USGS) e da altre importanti agenzie sia americane che europee.

3.1 Misuratori di velocità di flusso

Lo strumento utilizzato per misurare la velocità del flusso è il modello 6200, Tipo AA (Fig. 7). Esso viene calato in acqua dall'alto, grazie all'utilizzo di un carrello mobile apposito, dotato di braccio e argano. Il raggio d'azione del correntometro varia da 0.03 a 7.6 m/s, in accordo con le velocità previste per il fiume Reno.

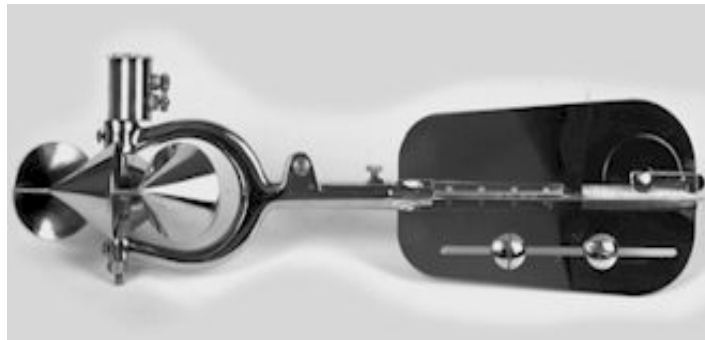


Figura 7 : Correntometro

Al correntometro vengono collegati appositi pesi (Fig. 8), dalla forma idrodinamica, per minimizzare la resistenza al flusso dell'acqua. Essendo solitamente più lunghi del correntometro, lo proteggono da eventuali urti con le pile dei ponti e/o i detriti trasportati dal corso d'acqua.

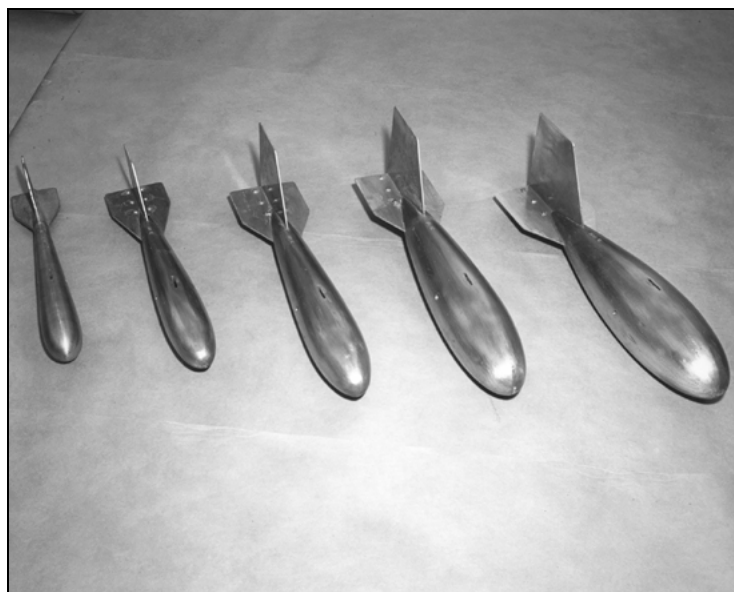


Figura 8 : Pesi idrodinamici

3.2 Campionatori per il trasporto solido

La misura del trasporto solido di un corso d'acqua è cosa ben più complessa che la valutazione delle portate liquide in quanto oltre a difficoltà operative si ha una certa variazione della concentrazione dei sedimenti sul fondo e nella sezione trasversale.

- **Modello US DH-76 per la misura del trasporto solido in sospensione**

Questo è un campionatore integratore isocinetico di medio peso (Fig. 9) in quanto pesa 11 kg ed è lungo circa 43 cm. Durante le operazioni di campionamento, lo strumento viene immerso in acqua in posizione orizzontale e calato a velocità costante. La sua forma idrodinamica orienta lo strumento mantenendo l'ugello, che cattura la miscela acqua-sedimento, posizionato contro corrente. Mentre il campione viene catturato, l'aria all'interno del contenitore esercita una pressione tale da bilanciare quella idrostatica, in maniera tale che la velocità d'ingresso sia paragonabile a quella della corrente del corso d'acqua.

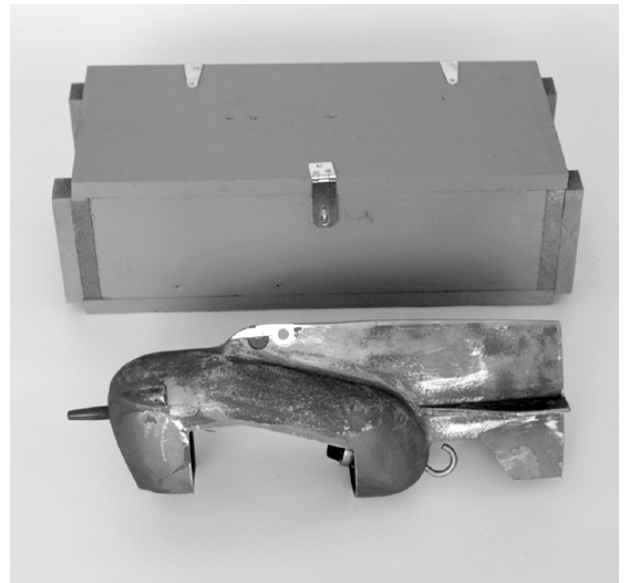


Figura 9 : Campionatore modello US DH-76

- **Modello Helley-Smith per la misura del trasporto al fondo**

Questo campionatore, del peso di 29.5 kg (Fig. 10) è dotato di una coda a pinna di pesce, che gli permette di orientarsi nella la direzione del flusso. E' dotato di una bocca quadrata di 7,1 cm di lato mentre il rapporto tra la dimensione della bocca e l'espansione retrostante è di 3,22. Alla parte posteriore della bocca viene fissato un apposito sacchetto di nylon con maglia di 0.1 mm, il quale permette il passaggio del materiale fine trasportato in sospensione e la cattura del sedimento più grossolano trasportato al fondo.



Figura 10 : Campionatore modello Helley-Smith.

4 MISURE DELLA PORTATA LIQUIDA SUI FIUMI RENO E SANTERNO

In data 3 Novembre 2003, è stata effettuata sul Reno (località Ponte della Bastia) la prima campagna di misurazione della portata liquida e di campionamento del materiale trasportato al fondo ed in sospensione, in concomitanza con la prima piena significativa della stagione. Queste misure sono state ripetute durante i giorni 27, 28, 29 Novembre 2003, in corrispondenza di livelli di piena, rispettivamente sempre più importanti.

4.1 Misure della portata liquida del Fiume Reno a Bastia

Per effettuare tali misure è stato suddiviso il ponte in tre settori, per la presenza delle pile del ponte, rispettivamente di 7.6, 12.8 e 13 metri di larghezza.

Sono state individuate in totale 10 verticali e per ciascuna verticale è stata misurata la profondità dell'alveo rispetto al pelo libero (h) e sono state effettuate due misure di velocità della corrente a profondità 0.2 h e 0.8 h, tramite l'apposito correntometro (Fig. 11).

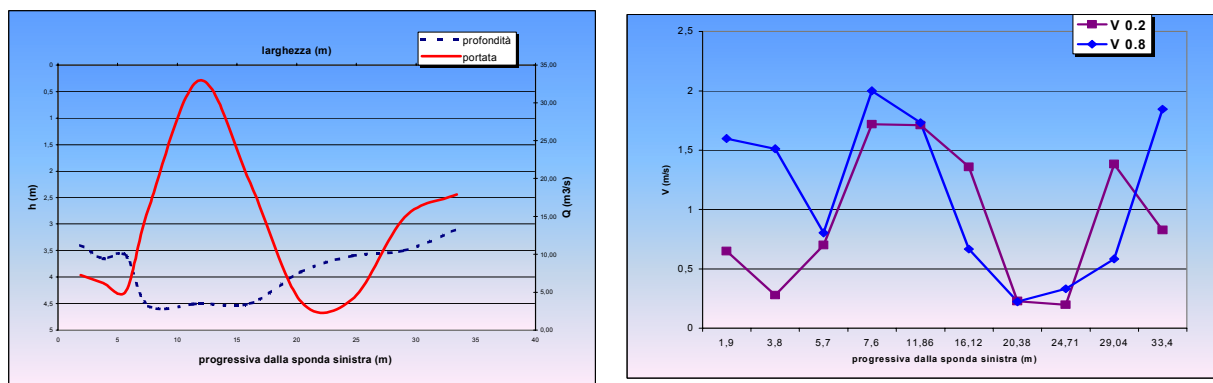


Figura 11: Profilo trasversale, andamento della portata liquida e andamento delle velocità a 0.2 e 0.8 di profondità rispetto al pelo libero.

Come si può osservare dai grafici, la sezione appare molto uniforme nella sua morfologia. Le profondità maggiori si osservano in corrispondenza delle verticali V3 bis, V4, e V5 con un massimo di 4.55 metri. Per quanto riguarda le velocità del flusso e le rispettive portate, oltre alle verticali già citate, si osservano valori molto considerevoli in corrispondenza di V8 e V9. Questo può essere causato, oltre che dalla presenza delle pile, anche dalla posizione del ponte, appena a valle della confluenza con l'Idice, che si immette nel Reno in destra idrografica e di un'ansa con leggera curva a sinistra. In assoluto i valori più bassi di portata sono stati registrati lungo le verticali V2, V6 e V7, dove la corrente è quasi nulla. Con una profondità media di circa 3.89 metri si è ottenuto un valore per la portata liquida pari a $127.82 \text{ m}^3/\text{s}$. Tale valore è perfettamente coincidente con quello ottenuto dai dati forniti dal servizio idrografico. Nei giorni 27, 28 e 29 Novembre 2003, i valori di portata liquida sono risultati i seguenti:

27-11 = $211 \text{ m}^3/\text{s}$ ($h= 5,50 \text{ m}$); 28-11 = $272 \text{ m}^3/\text{s}$ ($h= 6.60 \text{ m}$); 29-11 = $293 \text{ m}^3/\text{s}$ ($h= 7,05 \text{ m}$).

4.2 Misure della portata liquida del fiume Santerno

La sezione presso il ponte sul Fiume Santerno (località La Giovecca) è stata suddivisa, causa la presenza delle pile, in due settori di larghezza 1,8 metri e 17,5 metri (Fig. 12 e 13).

Il primo settore comprende la verticale V1, mentre il secondo settore le verticali dalla V2 alla V6. La distanza tra una verticale e l'altra è di 3,5 metri.



Figura 12 : Fiume Santerno.



Figura 13 : Ponte sul Fiume Santerno (località la Giovecca).

Qui di seguito sono riportate le tabelle riguardanti le tre campagne di misurazioni, effettuate nei giorni 27, 28, 29 Novembre 2003.

Naturalmente, grazie a questi dati è stato possibile ricostruire, per ciascun giorno, la sezione trasversale del Fiume lungo il ponte e visualizzare in maniera grafica la distribuzione delle portate liquide per ciascuna verticale, lungo la stessa sezione.

Qui di seguito sono riportati i relativi grafici:

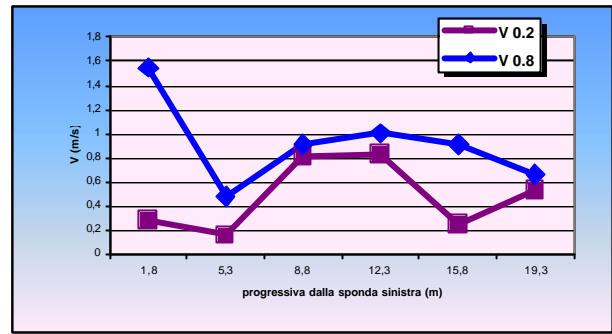
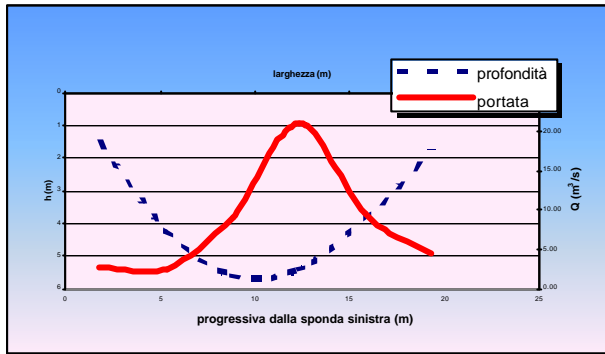


Figura 14 : Profilo trasversale, andamento della portata liquida e andamento delle velocità a 0.2 e 0.8 di profondità rispetto al pelo libero. 27-11-2003.

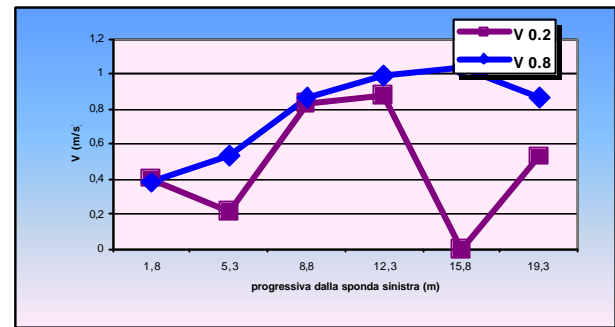
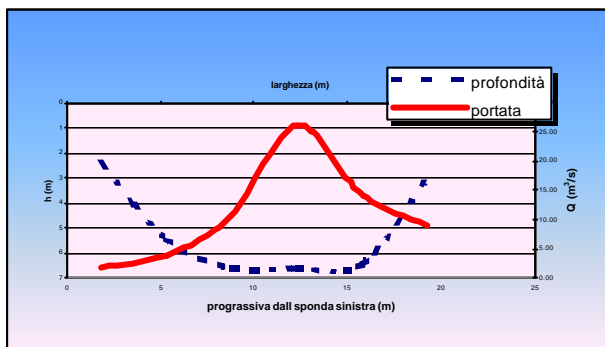


Figura 15 : Profilo trasversale, andamento della portata liquida e andamento delle velocità a 0.2 e 0.8 di profondità rispetto al pelo libero. 28-11-2003.

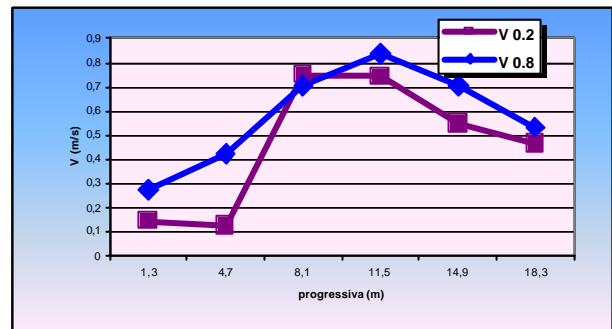
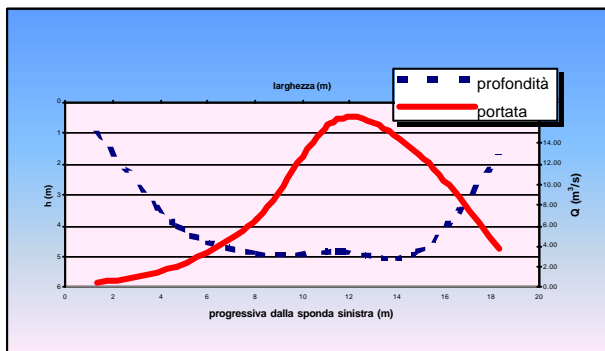


Figura 16 : Profilo trasversale, andamento della portata liquida e andamento delle velocità a 0.2 e 0.8 di profondità rispetto al pelo libero. 29-11-2003.

La sezione, nei tre grafici, appare molto uniforme, dalla tipica forma trapezoidale.

Le velocità sono distribuite in maniera tale che le velocità più alte coincidano con la parte centrale e più superficiale della sezione.

5 CAMPIONAMENTI DEL TRASPORTO SOLIDO DEI FIUMI RENO E SANTERNO

5.1 Premessa

Il movimento dei materiali in un corso d'acqua, o trasporto solido, si verifica in modalità differenti:

- *trasporto in sospensione*, che interessa i materiali fini e finissimi, diffusi in tutta la massa d'acqua in cui determina la "torbidità".
- *Trasporto per trascinamento sul fondo*, che consiste in un rotolamento dei ciottoli, talora uno slittamento, spesso in un procedere a balzi successivi ("saltazione");
- *Trasporto in soluzione*, che deriva dalla dissoluzione chimica nel bacino e nel letto, a spese dei materiali rocciosi con cui l'acqua è venuta in contatto;
- *Trasporto per fluitazione*, di materiali che galleggiano (ad esempio trasporto di grossi blocchi inglobati in lastre di ghiaccio).

Complessivamente la portata solida rappresenta la quantità di materiale trasportato che attraversa una sezione di un corso d'acqua nell'unità di tempo.

In questo studio sono stati presi in considerazione soltanto il trasporto torbido e quello al fondo, le modalità attraverso le quali si esplica quasi tutto il trasporto solido di fiumi come il Reno ed il Santerno.

In una sezione di un fiume di pianura prossima alla foce, la portata solida è rappresentata generalmente dal 90-95% da trasporto in sospensione, mentre il trasporto al fondo solo nei fiumi di montagna arriva a valori del 50-60% del totale, restando solitamente su valori al di sotto del 5-10% nei tratti terminali di pianura.

5.2 Campionamento del trasporto torbido del fiume Reno

Per ogni evento di piena si è scelto di effettuare campionamenti lungo un numero di verticali minore rispetto a quelle usate per la misura della portata liquida, in quanto l'esperienza ha mostrato una scarsa variazione laterale nei per fiumi con morfologia regolare dell'alveo come quella del Reno.

I risultati ottenuti sono stati raccolti nella figura 17:

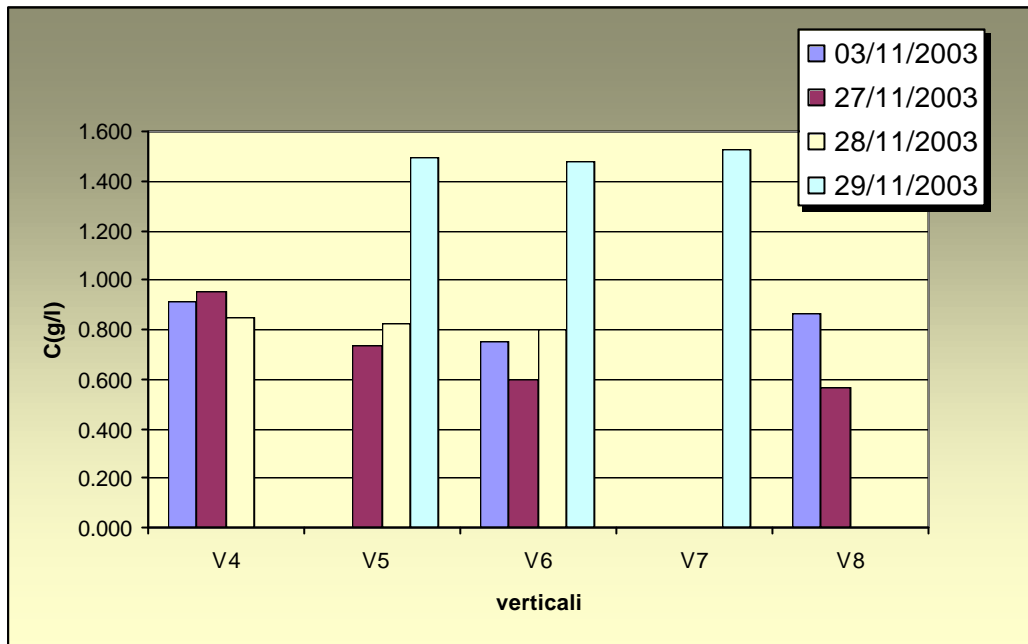


Figura 17 : Trasporto torbido Reno (C = concentrazione del materiale trasportato in sospensione.).

Come si può osservare le concentrazioni maggiori, nei giorni 3 e 27 Novembre, si registrano in corrispondenza della verticale V4.

Nei giorni 28 e 29 Novembre, aumentando l'intensità dell'evento di piena, si può osservare un livellamento dei valori lungo le verticali considerate, a testimoniare una distribuzione omogenea del sedimento lungo la sezione esaminata, oltre un certa portata liquida.

Il campione con torbidità maggiore, pari a 1,523 g/l, è stato raccolto in corrispondenza della verticale V7, il 27 Novembre,

mentre quello minore, 0,564 g/l, lungo la verticale V8, il 27 Novembre.

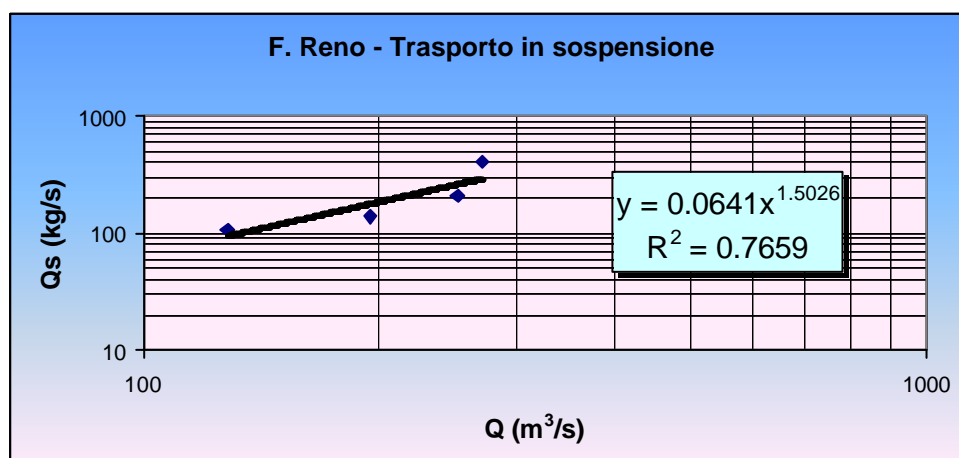


Figura 18 : Trasporto in sospensione in relazione alla portata liquida, Fiume Reno

5.3 Campionamento del trasporto torbido del fiume Santerno

Nel Santerno tali campionamenti sono stati effettuati esclusivamente per le verticali V4 e V5.

Qui sotto viene riportato il grafico corrispondente:

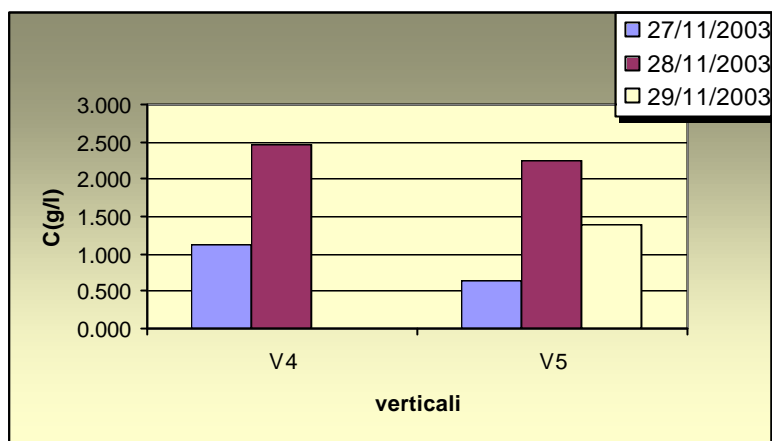


Figura 19 : Trasporto torbido Santerno (C = concentrazione del materiale trasportato in sospensione.)

Anche in questo caso, si nota la tendenza al livellamento dei valori, con la crescita della portata liquida.

Il valore più alto è 2,457 g/l, mentre quello più basso è 0,649 g/l.

Avendo effettuato i campionamenti durante gli stessi giorni, in condizioni di afflussi meteorici confrontabili, è possibile affermare che il Santerno ha una maggiore concentrazione di materiale in sospensione rispetto al Reno.

6 CAMPIONAMENTI DEL MATERIALE TRASPORTATO AL FONDO

6.1 Reno

Il trasporto di sedimento al fondo può avvenire secondo tre modalità differenti: rotolamento, scivolamento e saltazione.

Il trasporto è dovuto alla spinta esercitata dal fluido in movimento sulla superficie del fondo, in grado di vincere il peso della particella e l'attrito con lo stesso (fig. 20).

Nel movimento per saltazione le particelle si spostano nella direzione del flusso saltando e rimbalzando, e ciò implica brevi momenti in cui le particelle si trovano in sospensione nel fluido.

Per ogni evento di piena monitorato, è stato raccolto materiale trasportato al fondo.

I campionamenti sono stati effettuati su tutte le verticali, ma solo in corrispondenza delle verticali centrali, si è misurato un trasporto apprezzabile.

La quantità di materiale raccolto, a dispetto della portata del Reno, è stata molto scarsa, tranne rarissime eccezioni.

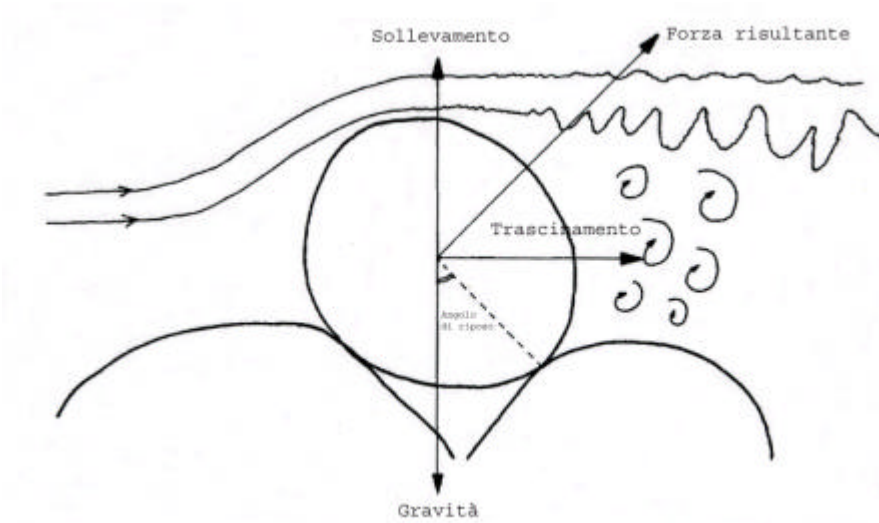
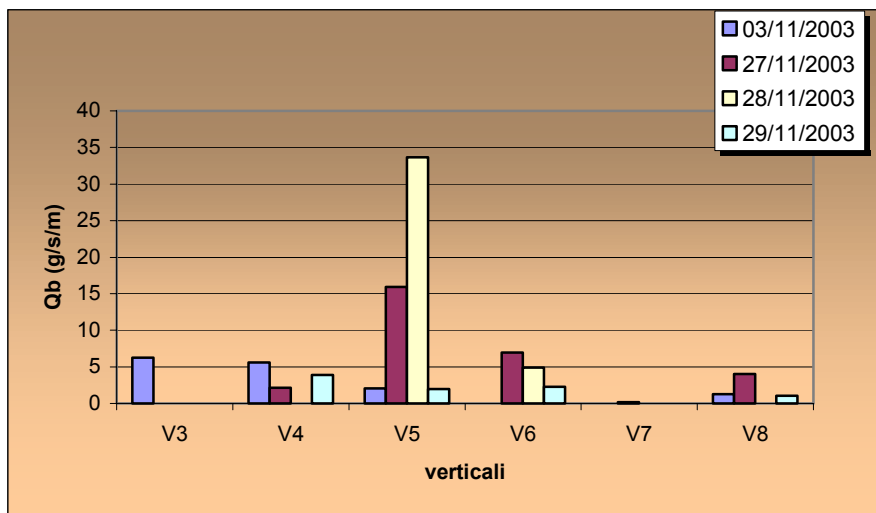


Figura 20 : Forze agenti su una particella sferica adagiata sul letto di un fiume, sotto l'azione del flusso d'acqua.

Nella figura 21 sono riportate le quantità di materiale raccolto, espresse in grammi al secondo per metro lineare, per ciascuna verticale:



$D_{50} \text{ med} = 0.405 \text{ mm}$

$\sigma = 0.07 \text{ mm}$

Figura 21 : Trasporto al fondo, Reno.

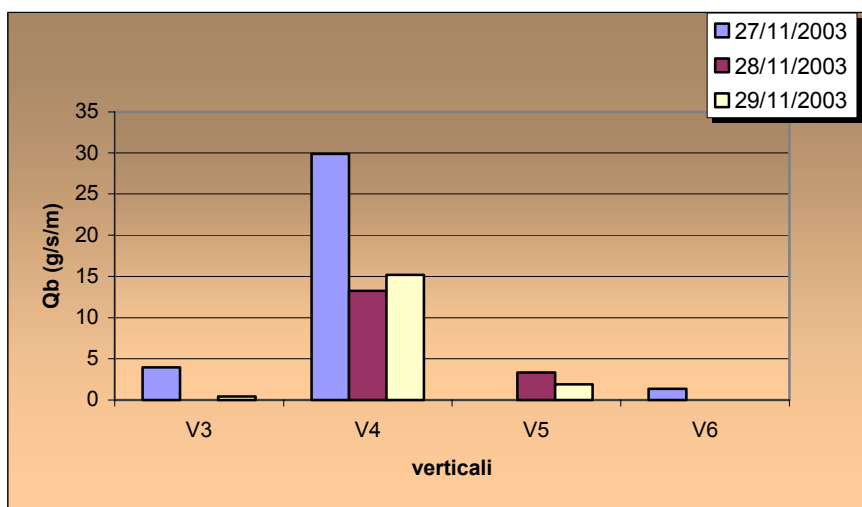
Come si può notare dal grafico, a dispetto degli alti valori di portata, la quantità di materiale catturato al fondo è molto scarsa, fatta eccezione per la verticale V5.

I campioni sono quasi interamente formati da sabbia media e sabbia grossolana con, talora, presenza di fango associata soprattutto a processi di infiltrazione e di amalgama con i sedimenti di fondo, ma non significativa ai fini del trasporto al fondo.

6.2 Santerno.

I campionamenti del materiale trasportato al fondo, sono stati effettuati con le stesse modalità adottate per il Reno. Anche per il Santerno è da notare come il trasporto al fondo non avvenga lungo tutta la sezione, ma si concentri in corrispondenza di determinate verticali.

Nel grafico (Fig. 22), è evidente tale fenomeno, che si ripete per ogni campagna di misure:



$D_{50} \text{ med} = 0.557 \text{ mm}$

$\sigma = 0.257 \text{ mm}$

Figura 22 : Trasporto solido, Santerno.

E' molto interessante notare come la maggior parte del materiale venga quasi esclusivamente trasportato lungo la verticale V4.

A differenza del Reno le quantità specifiche di materiale catturato, in rapporto alle portate, sono decisamente maggiori e come si vede anche il D_{50} del materiale trasportato risulta differente da quello del Reno.

I campioni sono quasi interamente formati da sabbia media e grossolana, con una buona percentuale (circa 12%) di sabbia molto grossolana (del tutto assente nel Reno).

Il D_{50} è di 0.557 mm. Qui di seguito sono riportate due tabelle, nelle quali sono messi a confronto i valori di trasporto solido al fondo del Reno e del Santerno.

Tabella 1 : Trasporto solido al fondo(Qb) in relazione alla portata liquida (Q), fiumi Reno e Santerno.

Data	Reno		Santerno	
	Q (m ³ /s)	Qb (Tonn/g)	Q (m ³ /s)	Qb (Tonn/g)
03/11/2003	127	5.6	-	-
27/11/2003	195	108.8	49.6	106.5
28/11/2003	252	145.1	65.6	5
29/11/2003	271	35	42.4	5.3

Tabella 2 : Trasporto solido al fondo unitario (Qb) in relazione alla portata liquida (Q), fiumi Reno e Santerno.

Data	Reno		Santerno	
	Q (m ³ /s)	Qb (Tonn g ⁻¹ m ⁻¹)	Q (m ³ /s)	Qb (Tonn g ⁻¹ m ⁻¹)
03/11/2003	128	0.17	-	-
27/11/2003	195	3.26	49.6	5.52
28/11/2003	252	4.35	65.6	0.26
29/11/2003	271	1.05	42.4	0.27

Non si riscontra una correlazione tra portata liquida e trasporto di sedimento mentre è evidente come entrambi i fiumi trasportino scarse quantità di sedimento.

Gli unici valori confrontabili sembrano quelli di giorno 27, in cui il trasporto unitario del Santerno è notevolmente più alto di quello Reno.

Qui di seguito (Tab. 3) sono riportati i rapporti tra sedimento trasportato al fondo ed in sospensione.

A conferma della scarsa capacità di trasporto del Reno, i valori sono tutti inferiori allo 0.1%, a dispetto dei dati di letteratura che vorrebbero, per fiumi di pianura con le caratteristiche del Reno, valori compresi tra il 5 ed il 10%.

Tabella 3 : Rapporto tra trasporto al fondo (Qb) e trasporto in sospensione (Qs) dei fiumi Reno e Santerno.

Data	Q (m3/s)	Qb (tonn/g)	Qs (tonn/g)	Qb/Qs
03/11/2003	128	5.6	9239	0.0006
27/11/2003	195	108.8	12029	0.009
28/11/2003	252	145.1	17984	0.008
29/11/2003	271	35	35145	0.001

7 STIMA DEL TRASPORTO SOLIDO SECONDO LA FORMULA DI ENGELUND ED HANSEN

Fra tutte le formule proposte dalla letteratura del settore, quella che sembra fornire stime più attendibili, sulla base del maggior numero di verifiche effettuate con buono successo per alvei con caratteristiche morfologiche e sedimentologiche simili a quelle del Reno è quella di Engelund e Hansen, proposta per la prima volta nel 1967.

Secondo questo modello il trasporto solido medio annuo dei sedimenti dell'alveo di un corso d'acqua di pianura è calcolabile con la:

$$T_s = 1.47 * 1/D * 1/B^{0.7} * i^{1.65} [Q_0 + (1.326/a^{-2} - 2.303 * b/a)] \text{ (Montefusco, 1984)}$$

Con T_s trasporto solido medio del materiale di fondo in milioni di tonnellate/anno, D il diametro mediano dei sedimenti del fondo, B la larghezza della sezione utile ai fini del trasporto, i il gradiente d'energia (normalmente assimilato alla pendenza del letto), Q_0 , a e b dei parametri che esprimono la distribuzione di frequenze di portate caratteristiche annuali (Montefusco, 1984)

E' stato, quindi, possibile ottenere una stima del trasporto del materiale di fondo del fiume Reno per il periodo 1929-1943, per il periodo 1929-1978 e stime annuali per i periodi 1955-1978 e 1997-2001 (Fig. 23).

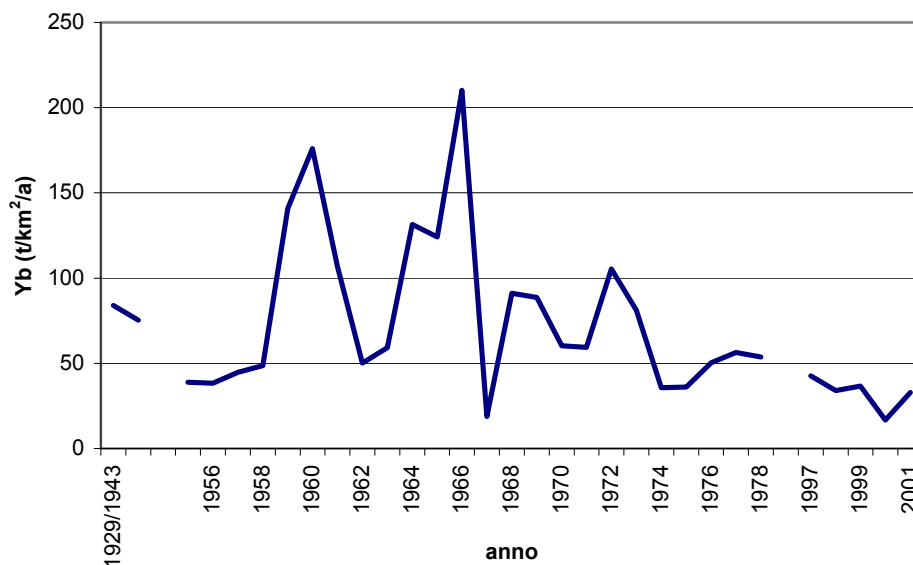


Figura 23 : Stima del trasporto di materiale di fondo del Fiume Reno (Engelund e Hansen, modificata - Montefusco, 1984).

Come si può osservare nel grafico di figura 23, mentre nei periodi 29-43 e 55-78, si hanno rispettivamente 83.96 e 79.41 t/km², nel periodo che va dal 1997 al 2001 il trasporto solido del materiale di fondo si riduce più del 40%, registrando un valore medio di appena 32,59 t/km².

Tali stime sembrano essere confrontabili con i dati riguardanti il trasporto solido torbido (Y_s), presenti negli Annali Idrologici del Servizio Idrografico (Fig. 22).

Ancora una volta è evidenziato lo scarso trasporto del materiale di fondo del Fiume Reno, in relazione al trasporto torbido, espresso in tonn/km² per anno (Fig. 23).

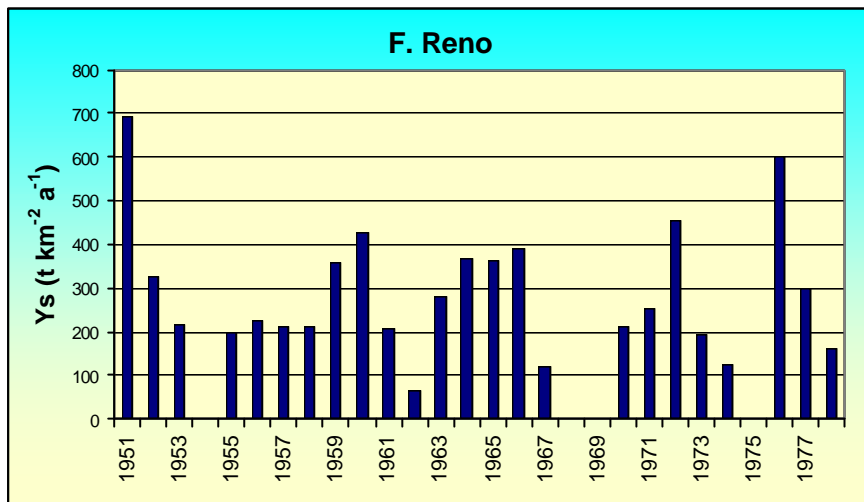


Figura 24 : trasporto torbido Fiume Reno.

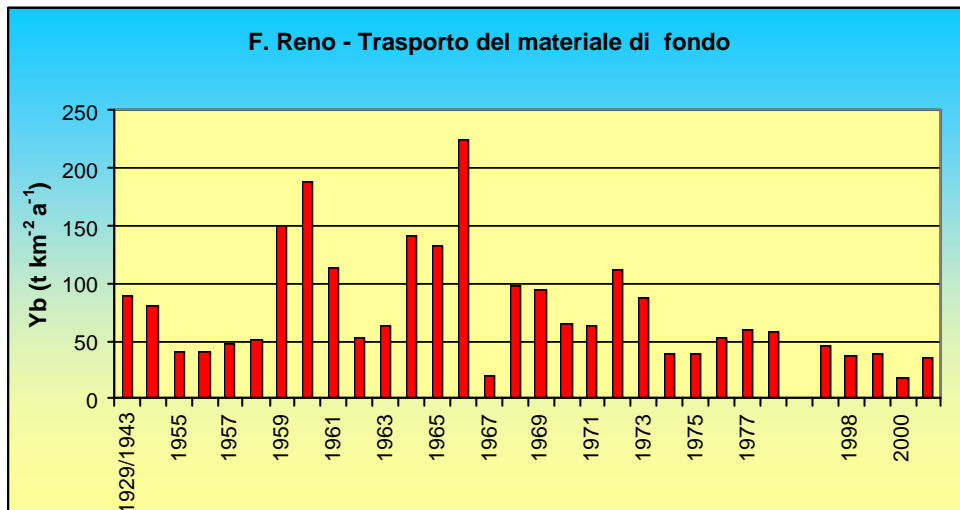


Figura 25 : Stime del trasporto al fondo Fiume Reno .

CONCLUSIONI

Nella valutazione delle conclusioni trattate in questo lavoro è molto importante tenere in considerazione, sia la brevità del periodo di monitoraggio, che la quasi completa assenza di dati sul trasporto solido, sia in letteratura che, in particolare, sul F. Reno.

Con il sistema di misure impiegato è stato possibile ottenere dati significativi sulla granulometria del materiale del letto e di quello trasportato al fondo, quantificare il trasporto solido per ogni singolo livello di piena e metterlo in relazione alla portata liquida; stimare il trasporto al fondo annuale in riferimento alle caratteristiche geometriche della sezione presa in considerazione (Ponte della Bastia), alla dimensione dei granuli trasportati, alle portate caratteristiche annuali e al gradiente d'energia del fiume.

Le misure effettuate hanno consentito di mettere in evidenza la scarsa quantità di trasporto al fondo del Reno, soprattutto negli ultimi anni (circa $33 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), in rapporto al periodo 1929-1978, in cui i valori di trasporto al fondo medi sono stati stimati in circa $70 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$.

Una ulteriore conferma di ciò è si avuta mettendo in relazione la quantità di materiale trasportato in sospensione e al fondo, per lo stesso evento di piena.

I valori ottenuti ($< 0.1\%$) sono molti più bassi di quelli espressi in letteratura per fiumi di pianura, con caratteristiche idrauliche e sedimentologiche simili al Reno, in cui il trasporto al fondo dovrebbe essere tra il 5 ed il 10% del trasporto totale.

Ringraziamenti

La realizzazione del seguente lavoro non sarebbe stata possibile senza il contributo offerto da alcune persone tra cui Emanuele Preciso, Francesco Droghetti, Christian Boettger, Michele Bettarello per avere partecipato alle campagne di campionamento e Massimiliano Fazzini per avere fornito elementi utili per la realizzazione dell'inquadramento climatologico dell'area di studio.

Riferimenti bibliografici

Billi, P. & Paris, E. (2004). *“Bed load transport and channel dynamics of the Ombrone River (Tuscany, Central Italy)”*, 32° IGC, Firenze, Agosto 20-28, Abstract volume.

D’Agostino, V. & Lenzi, M. (1996) *“La valutazione del trasporto solido di fondo nel bacino attrezzato del Rio Cordon.”* L’acqua, 4, 1996, 23-40.

Engelund, F., Hansen, E., (1967). *“A monograph on sediment transport in alluvial streams”*. Teknisk Forlag, Technical Press, Copenhagen, 62 pp.

Motefusco L. (1984). *“Un criterio semplificato per il calcolo del trasporto solido medio di un fiume.* Atti di: Seminario su Idraulica del Territorio Montano, Istituto di Idraulica G. Poleni, Università degli Studi di Padova, Bressanone, pp. 431.

Tacconi, P & Billi, P. (1987). *“Bed load transport measurements by the vortex-tube trap on Virginio Creek, Italy”*, in Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers, Thorne, C. R., Bathurst, J. C. & Hey, R. D.