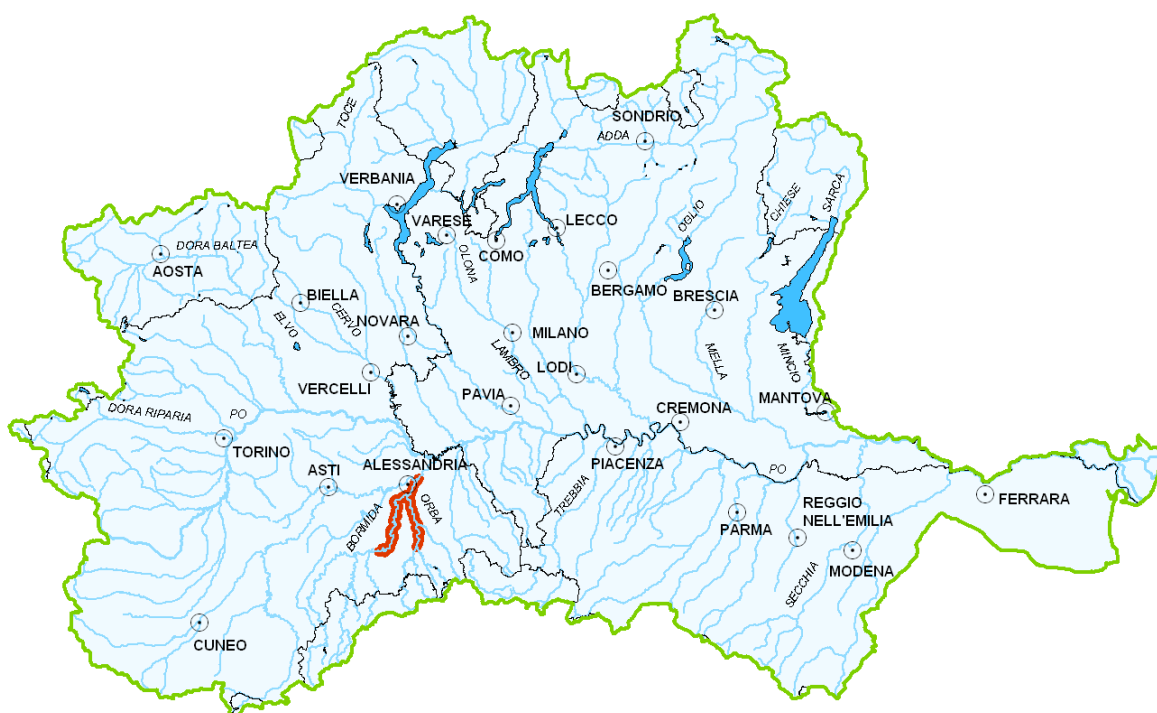




AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO

Studio di fattibilità per la definizione dell'assetto di progetto – interventi di gestione sedimenti, recupero morfologico e sistemazione idraulica – del fiume Bormida e del torrente Orba (E-SPEC-858)



F. Bormida e T. Orba

Attività	06	Analisi del trasporto solido
Prodotto	01	Metodologie di analisi, contenuti sviluppati, risultati conseguiti
Elaborato	01R	Relazione descrittiva dell'attività

0	Definitiva	Ing. Davide Persi	Ing. Ivo Fresia	Ing. Ivo Fresia	Ottobre 2011
Rev.	Versione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data

Associazione Temporanea di Imprese



Indice

1	PREMESSA.....	2
2	CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE ATTUALI DELL'ALVEO INCISO	2
2.1	Fiume Bormida	2
2.2	Torrente Orba	3
3	TRASPORTO SOLIDO DEL BACINO MONTANO	5
4	DINAMICA D'ALVEO CORRELATA AL TRASPORTO SOLIDO	8
5	AREA DI APPLICAZIONE DEL MODELLO	10
5.1	Modello ST del fiume Bormida: tratto Acqui Terme – confluenza Tanaro	10
5.2	Modello ST del torrente Orba: Rocca Grimalda – confluenza Bormida	13
6	MESSA A PUNTO DEL MODELLO	15
6.1	Metodologia	15
6.2	Dati di input.....	16
6.2.1	Condizioni al contorno idrodinamiche	16
6.2.1.1	Condizioni al contorno di monte: portata a bordi pieni.....	16
6.2.1.2	Condizione al contorno di valle: scala di deflusso	16
6.2.2	Caratteristiche del materiale.....	18
6.2.3	Portata liquida: analisi di sensitività.....	23
7	MODELLAZIONE A FONDO FISSO	26
7.1	Effetti indotti dalla variazione di portata	27
7.2	Effetti della scelta della formulazione di calcolo del trasporto solido	30
7.3	Integrazione: modellazione a fondo fisso tratto di monte del torrente Orba e Stura di Ovada	33
8	ANALISI DEI RISULTATI.....	36

1 PREMESSA

Il presente rapporto descrive le analisi condotte ed i risultati ottenuti nell'ambito dell'indagine sulle condizioni del trasporto solido per il tratto della Bormida compreso tra Acqui Terme e la confluenza in Tanaro e del torrente Orba, da Silvano d'Orba a confluenza Bormida, successivamente esteso a monte fino all'altezza di Molare.

La Bormida e, in misura leggermente inferiore, l'Orba sono corsi d'acqua morfologicamente attivi caratterizzati da un trasporto solido relativamente elevato e variazioni morfologiche locali dovute a fenomeni di scalzamento, erosione e deposito che si manifestano durante gli eventi di piena.

Poiché non esistono misure dirette di trasporto solido e nemmeno rilievi topografici di sezioni d'alveo ripetuti nel tempo, per ottenere una stima credibile del trasporto solido e delle relative influenze sullo sviluppo morfologico dell'alveo si è fatto ricorso a un modello numerico di simulazione di tipo integrato idrodinamico-trasporto solido.

2 CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE ATTUALI DELL'ALVEO INCISO

Nelle sezioni dello studio che analizzano l'assetto morfologico dell'alveo dei due corsi d'acqua sono diffusamente trattate le caratteristiche morfologiche nelle condizioni attuali, sulla base delle indagini in campo dirette e delle elaborazioni relative alla documentazione conoscitiva disponibile.

Si sintetizzano nel seguito gli elementi salienti, posti a base delle elaborazioni successive relative al trasporto solido.

2.1 Fiume Bormida

Partendo da monte, l'alveo inciso del fiume Bormida ha carattere da meandriforme a sinuoso, con sezione notevolmente incassata, sponde ripide su un fondo con frequenti affioramenti del substrato (a valle di Acqui e, successivamente, della traversa di Visone) e caratteri di sostanziale stabilità piano-altimetrica.

A monte della traversa di Cassine, la morfologia a meandri si è instaurata a seguito della realizzazione della traversa stessa e mostra tutt'ora segni di una certa instabilità planimetrica. Il piano golenale è interessato da cave estrattive a fossa, prossime all'alveo inciso, potenzialmente interferenti con l'assetto morfologico.

Il profilo di fondo, ora stabile dopo un periodo con approfondimenti consistenti, ha una profondità media attorno a 5-6 m rispetto al piano alluvionale.

Da Cassine fino alla confluenza dell'Orba, si passa da una debole sinuosità a una conformazione a meandri alternata ad una sinuosità accentuata e si mantengono prevalenti condizioni di stabilità planimetrica e delle quote di fondo (anche in questo caso seguenti ai significativi abbassamenti storici recenti).

Il tratto terminale, a valle dell'Orba, assume invece una conformazione da debolmente sinuosa a rettilinea, dovuta a interventi di regimazione risalenti alla prima metà del '900, con sezione notevolmente incisa e sponde molto acclivi; mantiene i caratteri di stabilità planimetrica, con locale tendenza all'erosione di sponda, per ora contenuta dalle opere di difesa.

Complessivamente il corso d'acqua mostra quindi una variazione planimetrica modesta rispetto alle condizioni di fine '800 e praticamente insignificante nell'ultimo cinquantennio.

In alcuni punti, si osserva attualmente una parziale ripresa dei processi di erosione di sponda, che non sembrano comunque in grado di portare a modificazioni significative a breve termine; i processi evolutivi potrebbero accelerare notevolmente per la presenza di

numerosi siti estrattivi, sia attivi che abbandonati, nelle aree golenali, alcuni dei quali molto prossimi alla sponda attiva dell'alveo.

Il profilo di fondo, minimo e medio, (Fig. 1) mostra una pendenza che si mantiene quasi costante per tutto un esteso tratto centrale, con valori nettamente più elevati nei primi 10 km circa e più modesti limitatamente a una breve parte a monte della confluenza.

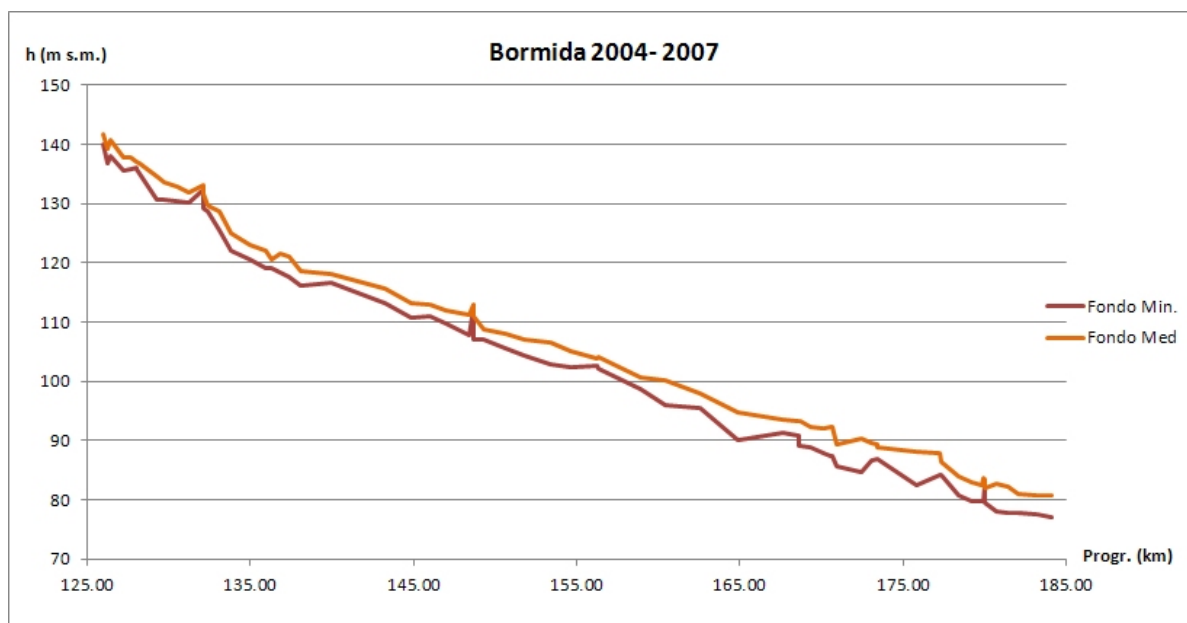


Fig. 1 F. Bormida: profili di fondo minimo e di fondo medio tra Acqui T. e la confluenza in Tanaro

Il confronto tra il profilo di fondo minimo e quello medio mette in evidenza una forma della sezione incisa prossima a quella rettangolare nel tratto di monte, che tende progressivamente a quella triangolare verso valle.

In merito agli abbassamenti storici recenti del profilo di fondo le considerazioni sintetiche sopra riportate sono illustrate dai profili rappresentati in Fig. 2.

22 Torrente Orba

A valle di Molare l'alveo, fino alla confluenza della Stura, è prevalentemente di tipo sinuoso, con affioramenti diffusi del substrato marnoso, a testimonianza dell'approfondimento del profilo di fondo, oggi contrastato dal materiale coesivo.

A valle di confluenza Stura, fino al Lemme, si ha un andamento alternato da sinuoso a rettilineo, incassato rispetto al piano golenale di circa 3-4 m, condizionato da opere di sponda sporadiche. A valle, fino a Casal Cermelli, cresce il condizionamento delle opere di sponda (molto diffuse) e delle traverse (roggia Bosco e roggia S. Michele) con alveo che si mantiene da rettilineo a sinuoso con barre alternate ciottolose e parzialmente vegetate. Infine verso la confluenza in Bormida, rettificata rispetto alla conformazione storica, il carattere sinuoso con barre alternate tende a sviluppare una certa propensione all'erosione spondale e all'ampliamento di sezione, congiuntamente con la maggiore incisione dell'alveo attivo.

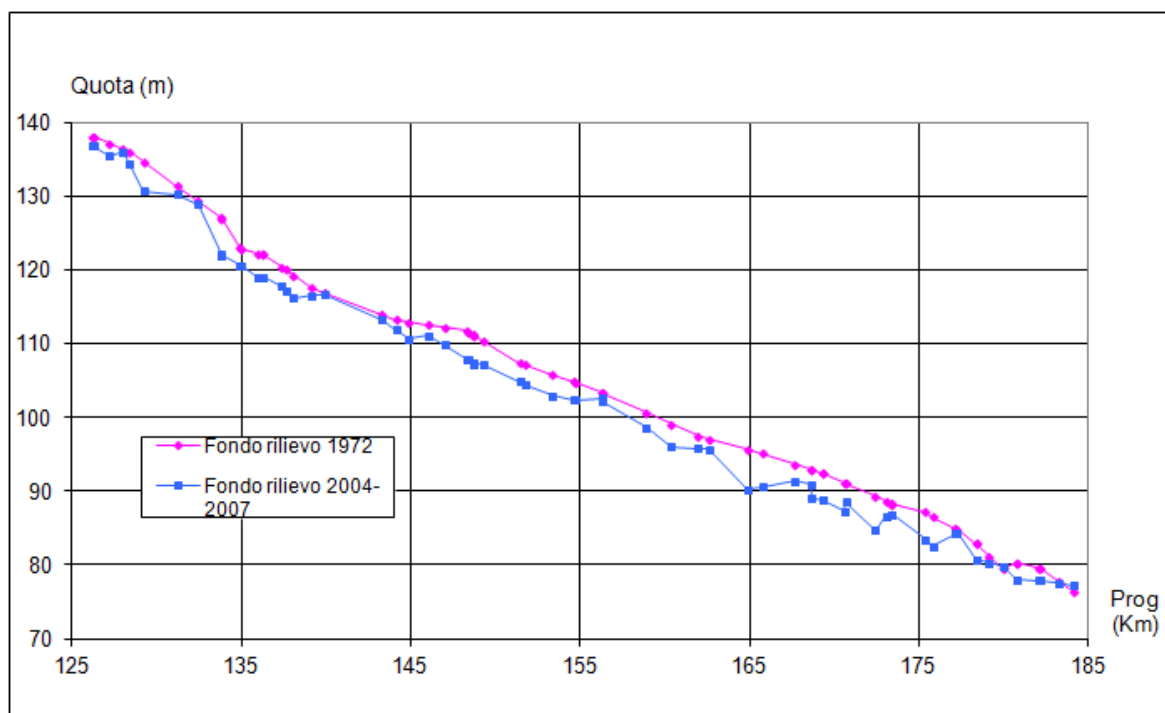


Fig. 2 F. Bormida: profili di fondo minimo attuale (2004-2007) e nel 1972 ricostruiti sulla base delle sezioni topografiche

Complessivamente l'alveo mostra una variazione planimetrica modesta rispetto alle condizioni di fine '800 e praticamente insignificante nell'ultimo cinquantennio (tracciato planimetrico stabile). A tale configurazione hanno sicuramente concorso le numerose opere di sponda. Il profilo di fondo ha subito in epoca storica recente un processo di abbassamento considerevole, stimato sulla base qualitativa delle osservazioni in campo (affioramento continuo del substrato tra Molare e Ovada, 2-3 m a Casal Cermelli e 5-6 m alla confluenza del Bormida). Nelle condizioni attuali non vi sono evidenze che il processo sia ancora in atto e in alcuni tratti appaiono indicazioni che consentono di ipotizzare una recente parziale tendenza al recupero della quota, anche se di modesta entità e non tale da fare ritenere possibile nei tempi brevi consistenti processi di sovralluvionamento.

Il profilo di fondo minimo mostra una pendenza significativamente omogenea per tutto il tratto indagato (Fig. 3), mentre il confronto con l'andamento del fondo medio mette in evidenza una forma della sezione che tende a permanere di tipo rettangolare anche nella parte di valle.

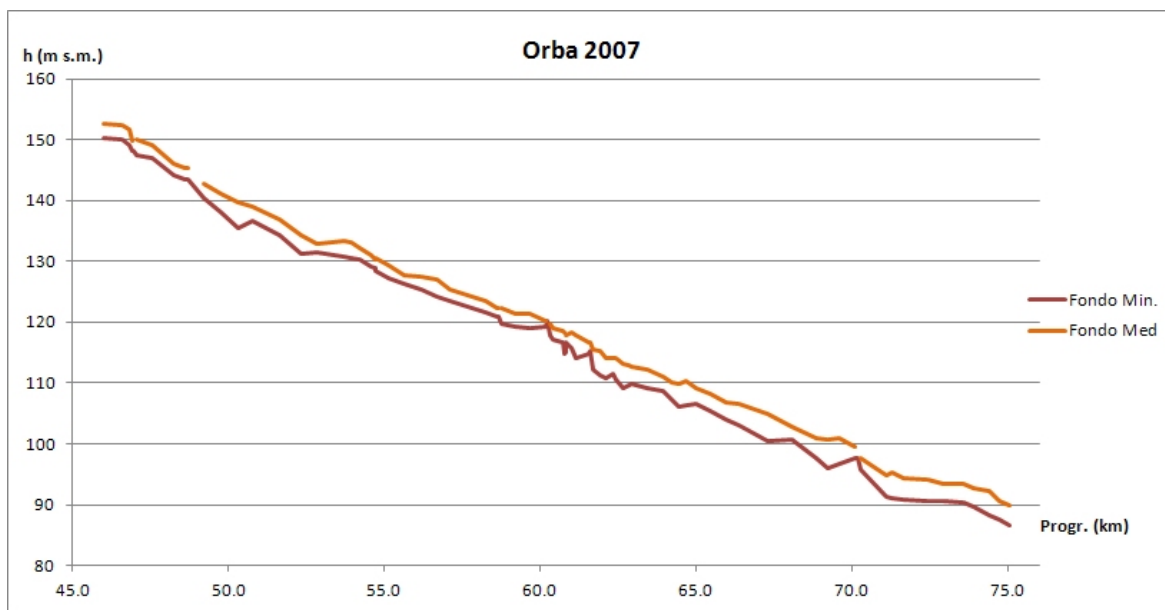


Fig. 3 T. Orba: profili di fondo minimo e di fondo medio tra Molare e la confluenza in Bormida

3 TRASPORTO SOLIDO DEL BACINO MONTANO

Per giungere ad una stima ragionevole del trasporto solido alle sezioni che individuano l'inizio dei tratti di studio di Bormida e Orba ci si è basati sui risultati dei dati di interrimento di alcuni dei principali invasi ubicati all'interno del bacino idrografico del Bormida.

In Tab. 1 è riportato il confronto tra il trasporto solido potenziale calcolato presso tali invasi con il metodo di Gavrilovic e il volume effettivo di interrimento.

Come noto il metodo di Gavrilovic S.¹ (1959) permette di stimare la produzione di sedimenti media annua in funzione del "peso" attribuito, sulla base di analisi statistiche, alle differenti variabili indipendenti considerate: fisiografia, piovosità, termometria, utilizzazione del territorio e assetto vegetazionale, erodibilità del substrato roccioso, condizioni di dissesto idrogeologico in atto.

L'interrimento è viceversa stato calcolato in sede di piano di gestione dei sedimenti degli invasi sulla base di un confronto tra il volume dell'invaso al momento di realizzazione dell'opera e quello effettivo al momento del rinnovo della concessione, determinato in base a rilievi batimetrici. Quest'ultimo, quindi, con tutte le incertezze del caso, rappresenta una misura "diretta" del trasporto solido sia di fondo che in sospensione intercettato dalla sbarramento.

Per tale confronto sono stati presi in considerazione i tre invasi di Ortiglieto (sull'Orba), di Valla (sull'omonimo torrente affluente di destra del Bormida di Spigno) e di Osiglietta (sull'omonimo torrente affluente di destra del Bormida di Millesimo). Si tratta a tutti gli effetti di dighe con volume di invaso sufficiente da permettere il deposito, oltre che del trasporto di fondo, anche di buona parte del materiale in sospensione. Come si vede i valori di interrimento specifico sono piuttosto variabili, ma la media nel complesso è coerente con i risultati ottenuti con il metodo di Gavrilovic che, d'altra parte, a suo volta, è stato definito sulla base della correlazione dei dati di interrimento di una serie di invasi dell'ex Yougoslavia.

¹ Gavrilovic S. (1959) « Methode de la classification des bassins torrentiels et equation nouvelles pour le calcul des hautes eaux et du debit solide ». Vadoprivreda, Belgrado.

Tab. 1 Confronto tra trasporto solido potenziale e reale presso alcuni dei principali invasi ubicati nel bacino del Bormida

Invaso	Apporto solido annuo al serbatoio	Bacino sotteso	Apporto specifico da interrimento	
			(m ³ /anno/km ²)	(mm/anno/km ²)
Valla (interrimento)	3500	68	51	0,05
Valla (Gavrilovic)	25000	68	368	0,37
Ortiglieto (interrimento)	40000	137	292	0,29
Ortiglieto (Gavrilovic)	40187	137	293	0,29
Osiglietta (interrimento)	15000	20	750	0,75
Osiglietta (Gavrilovic)	5330	20	267	0,27
media interrimento			364	0,36
media Gavrilovic			309	0,31
Piana Crixia (interrimento)	350	239	1	0,00
Piana Crixia (Gavrilovic)	86500	239	362	0,36

L'invaso di Piana Crixia, viceversa, presenta caratteristiche simili a quelle delle principali traverse presenti nei tratti oggetto di studio, ovvero sbarramento relativamente basso e modesto volume di invaso. Come si vede, all'interno di tale invaso il quantitativo di trasporto solido trattenuto è minimo, sia in assoluto sia rispetto a quello potenzialmente mobilitizzato nel bacino idrografico. Che tale effetto sia dovuto alla gestione dello sbarramento (con aperture periodiche) o alla scarsa capacità di trattenuta di sedimenti non è dato saperlo, tuttavia la conclusione che se ne può trarre è che l'influenza di invasi di questo tipo sul bilancio del trasporto solido è modesto, quando non è trascurabile. E' verosimile che la stessa conclusione possa essere estesa anche alle principali traverse presenti nei tratti di studio. A conferma di tale ipotesi è stato osservato che in alcuni casi (si vedano ad esempio traverse di Piamprato e Roggia San Michele sull'Orba – cfr . Foto 1) si hanno addirittura forme di accumulo di materiale grossolano subito a valle dell'invaso stesso.

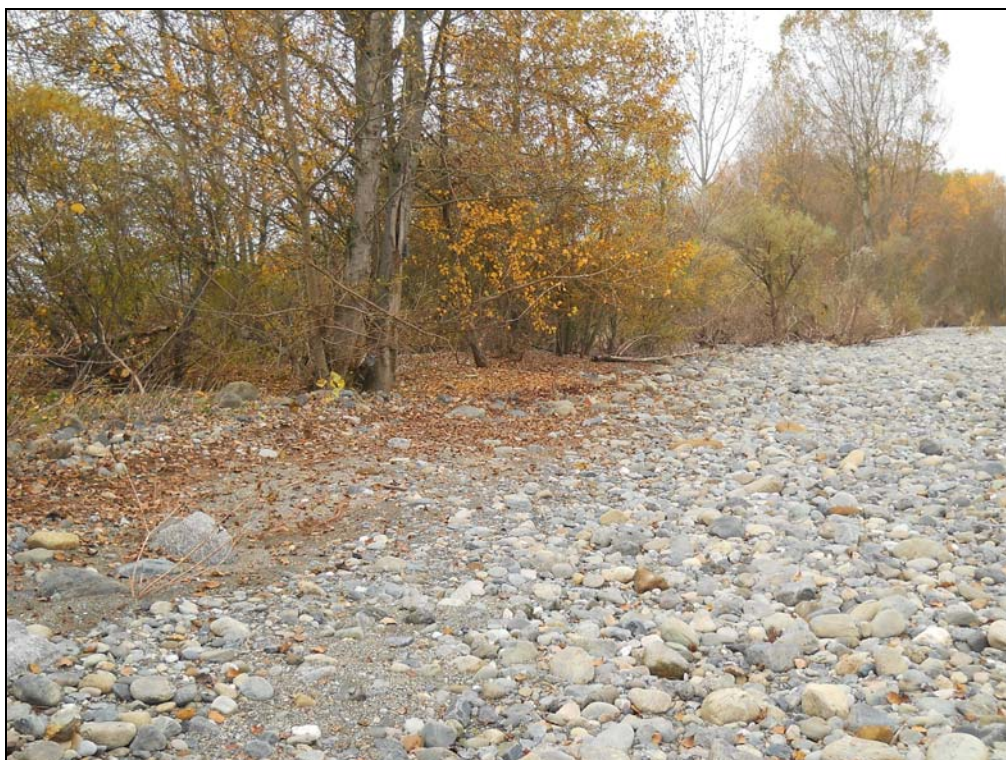


Foto 1 Piana alluvionale sovralluvionata presso la sponda sinistra dell'Orba circa un centinaio di metri a valle della traversa della roggia San Michele

Facendo riferimento alla Tab. 1 si può quindi stimare sul bacino complessivo del Bormida un trasporto potenziale specifico medio di circa $330 \text{ m}^3/\text{anno}$ per km^2 , definito facendo media tra il valore calcolato con il metodo di Gavrilovic e quello misurato bacini artificiali. Tenendo conto di quanto trattenuto dagli invasi di Osiglietta, Valla e Ortiglieto per misura diretta e dall'invaso di Lavagnina in funzione della superficie del bacino sotteso, si può arrivare alla stima del trasporto solido potenziale all'inizio dei tratti di studio riportata in Tab. 2.

Tab. 2 calcolo del trasporto solido potenziale nei punti di immissione nei tratti di studio

Sezione	Superficie	Trasporto solido totale	Trasporto solido al netto invasi	Invasi considerati
	(km^2)	(m^3/anno)	(m^3/anno)	
Bormida ad Acqui	1355	447150	428650	Valla e Osiglietta
Orba a Rocca Silvano d'Orba	434	143220	87050	Ortiglieto e Lavagnina
Lemme confluenza Orba	183	60390	60390	

Nell'esaminare tali valori occorre tenere presente che il metodo di Gavrilovic, benché in questo caso sia stato tarato con i dati di interrimento di alcuni invasi montani, definisce il quantitativo di materiale potenzialmente eroso. Solo una parte di esso tuttavia subisce un trasporto fino al reticolo idrografico principale. Numerose possono essere infatti le aree di accumulo non solo artificiali ma anche naturali (depositi lacustri, conoidi, alluvioni di fondovalle, detrito di falda, frane ecc.). Poste queste premesse è evidente che la presenza di invasi pare poco rilevante sul Bormida in senso stretto, mentre l'influenza

sull'Orba potrebbe essere non trascurabile, visto che il trasporto potenziale si riduce a circa il 60% di quello naturale indisturbato.

4 DINAMICA D'ALVEO CORRELATA AL TRASPORTO SOLIDO

L'analisi è finalizzata allo studio della dinamica d'alveo del fiume Bormida e del torrente Orba con l'obiettivo di individuare le attuali tendenze evolutive di tipo generalizzato e le dinamiche di tipo localizzato.

Per il primo punto si deve fare riferimento alla media scala temporale (dell'ordine delle decine di anni), mentre per il secondo le valutazioni sono riferite al periodo di piena (dell'ordine delle decine di ore).

La metodologia di indagine si basa sulla stima della capacità di trasporto solido nelle singole sezioni e sul calcolo dei bilanci sedimentologici effettuato su tratti significativi dei corsi d'acqua.

La quantificazione delle tendenze evolutive è correlata all'entità degli squilibri rilevati e alla probabilità del loro verificarsi.

E' noto che la valutazione del trasporto solido è complessa e dai risultati privi di un grado di affidabilità confrontabile con quello della stima di altri parametri relativi alle condizioni di deflusso.

In particolare il trasporto solido lungo un'asta naturale risulta determinato sia da fenomeni locali (interazione diretta fra corrente e sedimenti dell'alveo) sia da fenomeni remoti (trasporto in sospensione di sedimenti sufficientemente fini da essere convogliati senza interazione con l'alveo: il cosiddetto *wash-load*) o comunque non strettamente locali (trasporto in sospensione di sedimenti rappresentati nell'alveo, ma presi in carico a monte del tronco considerato).

Va inoltre tenuto presente che nell'ambito generale della dinamica del trasporto solido relativa a un tronco d'alveo devono essere considerati schematicamente almeno i seguenti schemi di funzionamento:

- il *bilancio sedimentologico a medio termine* che fa riferimento alla valutazione della *capacità di trasporto* della corrente calcolata in una specifica condizione idraulica, assunta come significativa allo scopo, e rappresentata da quella corrispondente al convogliamento della piena con un tempo di ritorno modesto (normalmente 2-5 anni), la cui portata approssima la portata di bank-full (piene rive) dell'alveo attivo e la cosiddetta "portata dominante", concetto questo utilizzato nelle analisi morfologiche e che individua sinteticamente la portata cui si ritiene si adegui, sul medio-lungo termine, l'alveo attivo;
- il *bilancio sedimentologico a breve termine*, in cui si fa riferimento ad un singolo evento di piena e alle conseguenze che in termini di variazioni plano-altimetriche si possono manifestare nelle varie sezioni dell'alveo.

I due aspetti sono normalmente distinti anche nei risvolti delle operazioni di manutenzione dell'alveo, in quanto a seguito dei fenomeni di movimentazione e deposito di materiale che si manifestano nel corso di una piena intensa, si rendono necessari, e sono normalmente attuati, lavori di pronto intervento o di somma urgenza che puntano a ripristinare la normale geometria dell'alveo per garantirne l'efficienza.

In questi casi non è normalmente possibile attendere che il materiale depositato nell'alveo, proveniente dagli affluenti e dai tronchi di monte, venga rimesso in circolo e ridistribuito dai deflussi relativi al regime idrologico ordinario.

Il bilancio idrologico a medio termine, sostenuto dalle portate ordinarie del corso d'acqua, è invece quello a cui viene normalmente ascritta l'evoluzione morfologica dell'alveo, soprattutto in termini di variazione (abbassamento) delle quote di fondo.

Allo stato del presente studio non è pensabile la definizione dei due bilanci sedimentologici (di breve e di medio termine); ciò sia in relazione allo stato delle conoscenze disponibili sulle caratteristiche geometriche e idrauliche dell'alveo sia alla difficoltà scientifica di definizione delle grandezze coinvolte senza il supporto di un monitoraggio esteso su un periodo di tempo sufficientemente lungo, per una serie adeguata di parametri rappresentativi dei fenomeni.

Si è quindi stabilito di attuare comunque una valutazione di prima approssimazione delle grandezze in gioco con lo scopo di produrre delle analisi che puntino ad indirizzare le azioni da attuare nell'ambito del programma di gestione dei sedimenti.

Ovviamente tali valutazioni dovranno essere opportunamente approfondite nel futuro in relazione alle finalizzazioni più opportune che potranno derivare dalle prime fasi attuative del programma e sulla base, come detto prima, di indagini e di monitoraggi espressamente condotti.

Le elaborazioni condotte hanno pertanto riguardato il bilancio di medio termine con la finalità di definire indicatori delle dinamiche di tipo generalizzato, che si manifestano a media scala temporale e che sostengono l'evoluzione morfologica degli alvei.

Per le dinamiche di tipo localizzato, è possibile valutare lo squilibrio che si può manifestare tra due sezioni successive in base all'ipotesi che gli effetti dei fenomeni localizzati conseguenti al passaggio di un'onda di piena siano riconducibili alle sole variazioni altimetriche del fondo. Tali variazioni sono computabili con la formula semplificata proposta da Straub (1934), e successivamente confermata da altri autori (Garde, 1977):

$$y_2/y_1 = (b_1/b_2)^{0.63}$$

dove y_1 e y_2 rappresentano rispettivamente l'altezza d'acqua a monte e a valle nella condizione di fondo mobile, mentre b_1 e b_2 rappresentano le larghezze delle due sezioni delimitanti il volume di controllo.

La variazione altimetrica Δ (che risulta negativa e corrispondente quindi ad un fenomeno di erosione) è pertanto stimabile secondo Straub tramite la differenza:

$$\Delta = y_1 - y_2$$

Tale formula, dedotta utilizzando uno schema di moto uniforme, è risultata applicabile anche in condizioni di moto vario per la stima della massima profondità di erosione in prossimità di un brusco restringimento (Lamberti e Montefusco, 1984).

Per le *dinamiche di tipo generalizzato*, che si manifestano a *media scala temporale*, è stato fatta una valutazione della capacità di trasporto dell'alveo con riferimento alle portate di piena determinate idrologicamente.

Il calcolo è stato fatto per le portate con tempi di ritorno compresi tra 2 e 5 anni per la morfologia dell'alveo inciso.

Lo studio è stato condotto mediante la messa a punto di un modello numerico di simulazione monodimensionale di bilancio del trasporto solido a fondo fisso, finalizzato a valutare i valori di capacità di trasporto lungo i tratti in esame.

Per la rappresentazione dei fenomeni di trasporto solido è stato utilizzato il modulo ST (*Sediment Transport*) del codice MIKE 11, strettamente integrato con il modulo idrodinamico HD utilizzato per le analisi idrauliche.

Il modello, in quanto monodimensionale, non è evidentemente in grado di simulare la dinamica locale del trasporto solido in modo dettagliato, cosa che richiederebbe un modello bidimensionale se non addirittura tridimensionale. Nonostante ciò, i risultati che si ottengono con un modello basato sul codice MIKE 11 sono utili per fornire un inquadramento generale del problema ed ipotesi plausibili su quelli che possono essere i valori di portata solida lungo lo sviluppo dell'asta indagata.

I tronchi di corso d'acqua sono stati suddivisi in tratti omogenei in relazione alle caratteristiche morfologiche e, conseguentemente, alla dinamica dei processi di trasporto solido: ciò ha consentito una più organica definizione di alcuni parametri chiave nella stima del trasporto solido (primariamente, il diametro rappresentativo dei sedimenti) e una più agevole lettura dei risultati dell'indagine.

5 AREA DI APPLICAZIONE DEL MODELLO

Lo studio del trasporto solido riguarda il tratto della Bormida compreso tra il ponte di Acqui Terme e la confluenza in Tanaro e il tratto del torrente Orba a partire dalla sezione di confluenza Piota.

Per rappresentare la dinamica del fenomeno del trasporto solido è stato utilizzato un modulo specifico di MIKE 11, il modulo ST o meglio NST (Non-Cohesive Sediment Transport). Il modulo di calcolo del trasporto solido (ST) funziona come un modulo aggiuntivo in MIKE 11 al modulo idrodinamico (HD), dove il trasporto solido è calcolato in funzione dei risultati del modulo idrodinamico. Di conseguenza il modello di trasporto solido applica lo stesso schema di calcolo e gli stessi dati geometrici del modello HD precedentemente sviluppato.

Il modello idrodinamico, illustrato in dettaglio nel rapporto 05_01_01R nell'ambito del presente studio, è stato suddiviso in 2 sottomodelli, uno per ciascuno dei corsi d'acqua; è stato così approntato un modello per il fiume Bormida e uno per l'Orba. Entrambi i tratti sono stati suddivisi in sottotratti omogenei, in relazione alla dinamica morfologica sulla base di un'analisi di dettaglio delle caratteristiche specifiche. Gli elementi tenuti in conto per la definizione sono plurimi e i principali riguardano la natura del suolo, la presenza di opere con notevole influenza sul deflusso alveato, le caratteristiche geometriche dell'alveo, in particolare lungo la direzione longitudinale (ampi tratti rettilinei, presenza di meandri a curvatura elevata etc.). Nei paragrafi seguenti si illustrano più in dettaglio i due tratti per i quali è stato messo a punto il modello di simulazione SD.

5.1 Modello ST del fiume Bormida: tratto Acqui Terme – confluenza Tanaro

Il primo sottomodello ha origine in corrispondenza dell'abitato di Acqui T. e termina in alla confluenza con il fiume Tanaro, poco a valle della città di Alessandria.

La lunghezza del tratto supera di poco i 58 km (58171 m); circa 8 km a monte della sezione terminale è situata la confluenza dell'Orba.

La schematizzazione del modello è rappresentata in Fig. 4.

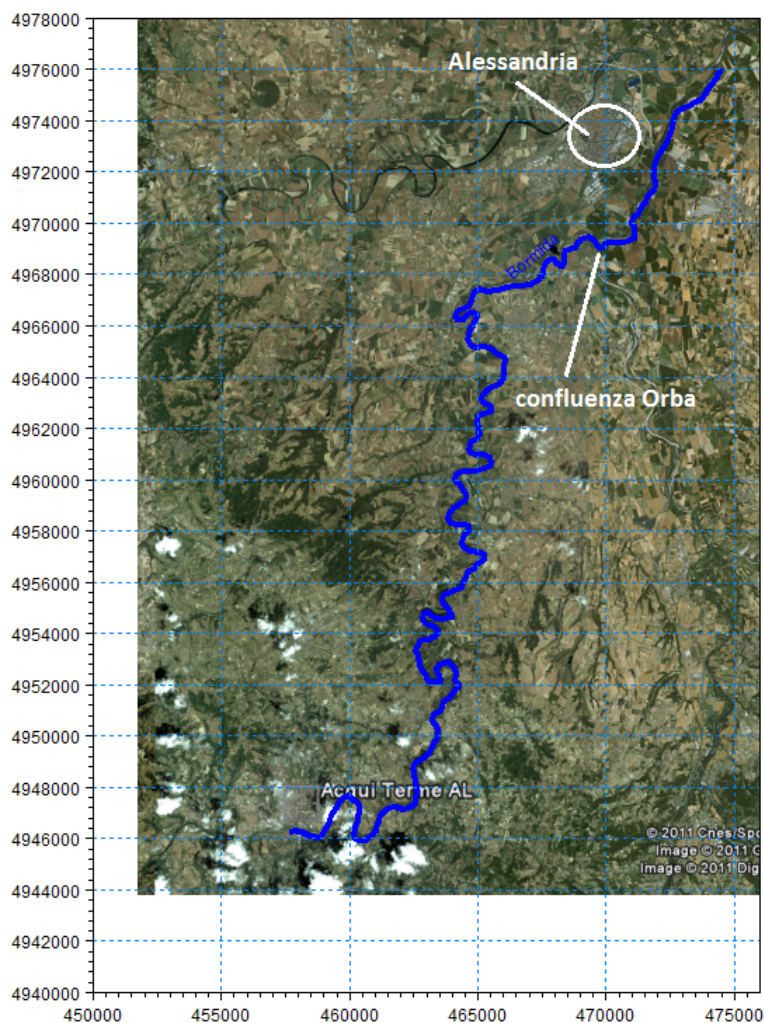


Fig. 4 F. Bormida: modello numerico per il bilancio di trasporto solido

Il tratto della Bormida è stato suddiviso in 13 sottotratti omogenei, rappresentati in Fig. 5. Si può notare come in tutti i casi gli elementi di discontinuità dei tratti omogenei siano costituiti o da una struttura (attraversamento o traversa) o dalla confluenza di un corso d'acqua. La lunghezza media dei tratti omogenei è poco inferiore a 4,5 km, con il valore massimo associato al tratto BO02100 pari a 6.521 m.

Si è inoltre rilevato come l'alveo dall'inizio tratto sino a circa 1,5 km a monte del ponte di Strevi (progressiva 137392) presenti possibilità di erosione pressochè nulla: ciò è stato assunto sulla base dei diffusi affioramenti di marne che caratterizzano tale porzione dell'alveo. Le marne, che dal punto di vista stratigrafico sono riconducibili alla formazione miocenica delle Marne di Cessole, hanno un comportamento sostanzialmente litoide (cfr. Foto 2). Ne consegue che la resistenza che oppongono ai processi erosivi è molto più elevata di quella sviluppata dagli ordinari depositi alluvionali e, pertanto, nel caso specifico, il letto può essere considerato sostanzialmente fisso. Si intende che, su periodi temporali decisamente più lunghi di quelli considerati, i processi erosivi diventano apprezzabili anche su substrati marnosi come quelli presenti.

A valle di Strevi, le formazioni marnoso-arenacee terziarie si immergono sotto i depositi alluvionali plioleistocenici e quindi teminano gli affioramenti diffusi in alveo di substrato a comportamento lapideo. Da tale punto verso valle, pertanto, il fondo alveo può essere considerato mobile anche se non si può escludere che i processi erosivi possano avere riesumato, localmente, dei livelli limosi, legati a strati fini all'interno del complesso

alluvionale Villafranchiano. Si tratta di depositi coesivi, relativamente addensati, che presentano una resistenza ai processi erosivi probabilmente superiore a quella delle alluvioni grossolane. La loro presenza, quasi sempre mascherata in magra da barre ghiaioso-ciottolose, è stata accertata con sicurezza solo in un caso, in corrispondenza di una rapida presso Castellazzo Bormida, ma può essere all'origine di alcuni localizzati cambi di pendenza e/o di morfologia dell'alveo distribuiti in tutto il settore compreso tra Strevi e l'attraversamento della A26.

In relazione alla schematizzazione del modello di trasporto solido si è ipotizzato che la presenza di detti livelli non abbia effetti rilevanti sull'evoluzione complessiva dell'alveo, potendo esserci al più una sovrastima dell'abbassamento del profilo di fondo. D'altra parte ubicazione, distribuzione e caratteristiche meccaniche di detti livelli non sono note e quindi simulare la loro presenza per via modellistica di fatto, allo stato attuale delle conoscenze, non è possibile.



Foto 2 Affioramenti di livelli marnosi sul letto del Bormida presso l'abitato di Acqui Terme

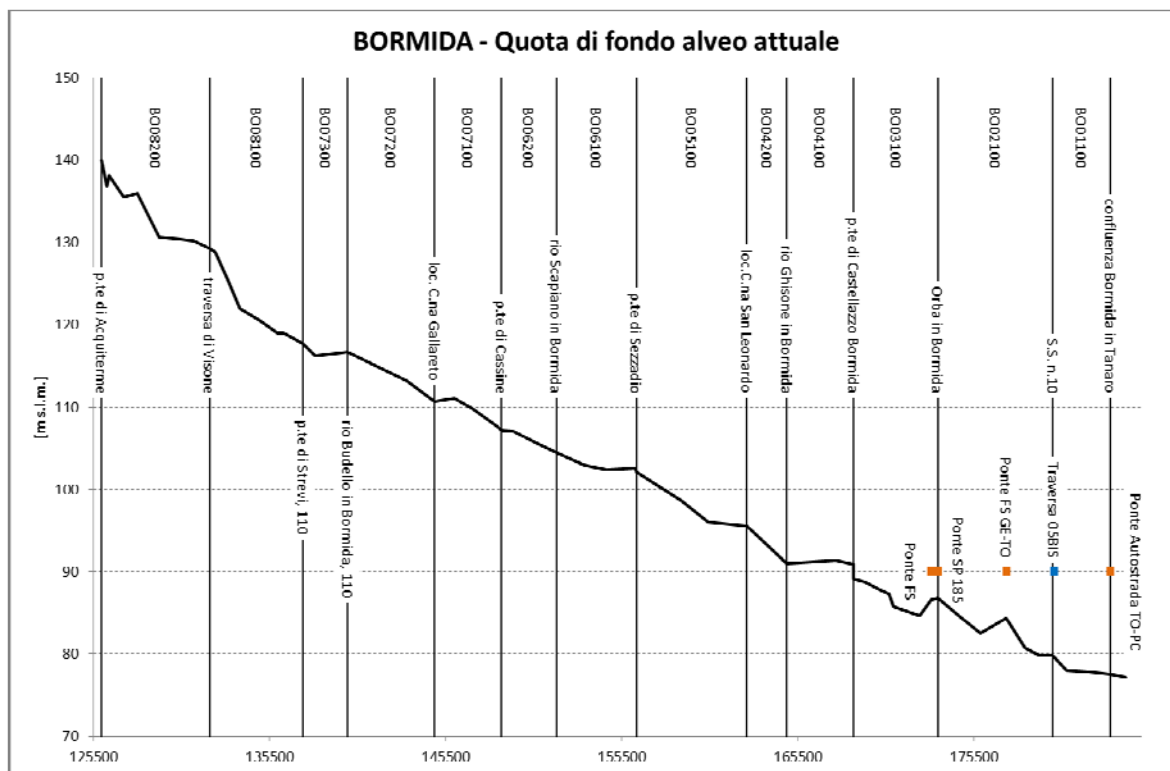


Fig. 5 Profilo longitudinale del fondo alveo sul fiume Bormida, con suddivisione in tratti omogenei

La suddivisione in tratti omogenei è stata sviluppata sulla base di criteri geomorfologici ed idraulici; per una descrizione di dettaglio si rimanda all'elaborato 03-01-01R_RelazioneAttività.

5.2 Modello ST del torrente Orba: Rocca Grimalda – confluenza Bormida

Il modello per il calcolo del trasporto solido sull'Orba ha la sua origine in corrispondenza dell'abitato di Rocca Grimalda (AL) e termina alla confluenza con il fiume Bormida, circa 30 km a valle della sezione iniziale (29.663 m).

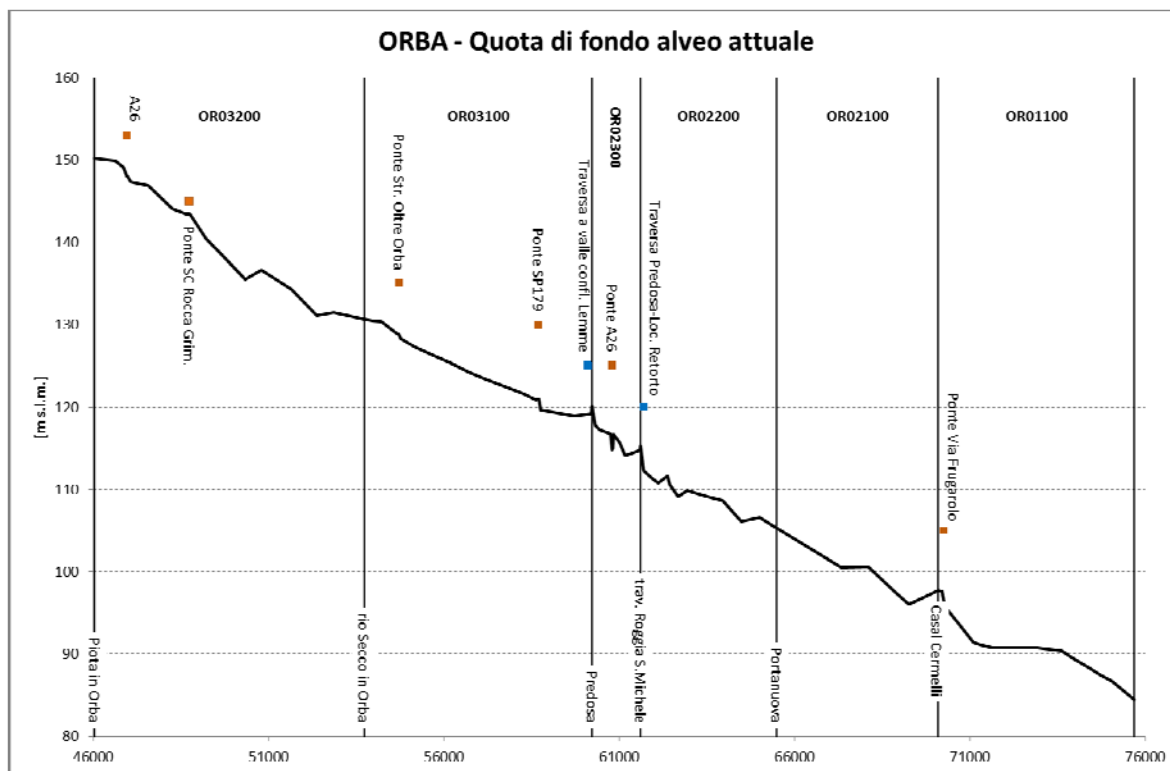
La schematizzazione planimetrica del modello per l'Orba è rappresentata in Fig. 6.



Fig. 6 Modello per il bilancio di trasporto solido sul torrente Orba

In Fig. 7 si riporta la suddivisione in tratti omogenei. I 6 tratti identificati hanno una lunghezza media circa pari a 5 km: solo uno (OR02300) presenta una lunghezza notevolmente inferiore a quella degli altri, pari a 1.376 m.

Nel caso dell'Orba, limitatamente al tratto indagato, non sono noti né affioramenti del substrato marnoso-arenaceo terziario, diffusamente presenti viceversa più a monte, nei pressi dell'abitato di Ovada, né emergenze di livelli coesivi inclusi nel materasso alluvionale pleistocenico (complesso Villafranchiano).



6 MESSA A PUNTO DEL MODELLO

6.1 Metodologia

Nella messa a punto del modello sono state applicate le seguenti ipotesi di calcolo:

- la schematizzazione del modello di trasporto solido è basata su quella adottata nel modello idrodinamico 1D messo a punto nell'ambito dell'attività 05_01_01R. Una descrizione del modulo HD è riportata nell'allegato 1;
- il modello idrodinamico fornisce gli input al modello ST in termini di portata, livelli idrici, velocità etc. Il modello ST considera condizioni di fondo fisso, ovvero non prevede un adeguamento morfologico dell'alveo: di conseguenza, la quota di fondo alveo rimane invariata e il valore di trasporto solido risulta costante nel tempo e pari alla capacità di trasporto della sezione;
- tra le varie formulazioni teoriche di trasporto solido presenti nel codice di calcolo MIKE 11-ST, si è fatto riferimento alle formule di *Engelund-Fredsoe*, *Engelund-Hansen* e *Smart-Jaeggi*, ovvero alle formulazioni più idonee in relazione alle caratteristiche dei corsi d'acqua in esame. La formula di Smart-Jaeggi, scelta come formula di riferimento per il calcolo del trasporto solido nel modello numerico sviluppato per questa attività, è stata enunciata per materiale grossolano e corsi d'acqua con discreta pendenza di fondo e per questo sembra maggiormente adatta alle caratteristiche tipiche della Bormida e dell'Orba nei tratti indagati. In ogni caso, visto che non è stato possibile realizzare un'effettiva taratura (di tipo quantitativo) del modello e al fine di valutare la rappresentatività della formula di Smart-Jaeggi stessa nel caso in esame, sono state applicate anche le altre due formule di confronto, ritenute comunque valide ed applicabili su corsi d'acqua con caratteristiche simili a quelli in esame. Una breve descrizione del modulo ST è riportata nell'allegato 2;

- il sedimento è composto da ghiaie con diametro caratteristico d_{50} variabile tra 9 e 16 mm lungo lo sviluppo dell'alveo della Bormida e dell'Orba;
- le condizioni iniziali per le valutazioni morfologiche derivano dai rilievi topografici condotti nell'ambito del presente studio ed utilizzati come dati geometrici nel modello idrodinamico. L'influenza sul trasporto solido delle strutture che interessano il deflusso alveato (traverse e attraversamenti) è stata valutata in modo da evitare che tali manufatti comportino instabilità: di conseguenza, si è proceduto a integrare nel modello le strutture con potenziale effetto perturbativo dal punto di vista del trasporto solido in modo che, pur continuando a influire correttamente sul deflusso, non comportino problemi alla modellazione ST.

6.2 Dati di input

I dati richiesti ed applicati come input al modello numerico sia idrodinamico che di trasporto solido sono descritti nel seguito. Considerando una configurazione a fondo fisso, finalizzata al calcolo della capacità di trasporto solido in ogni sezione, non è risultato necessario inserire condizioni al contorno di portata solida. In tale configurazione, infatti, il modello applica l'ipotesi di "*stabilità morfologica*" nelle varie sezioni: di conseguenza le portate solide stimate coincidono con i valori di capacità di trasporto solido relativi alle varie sezioni.

6.2.1 Condizioni al contorno idrodinamiche

Il modello idrodinamico utilizza di norma serie temporali o valori costanti di portata come condizione al contorno di monte e una serie temporale o valore costante di livello idrico o una scala di deflusso come condizione al contorno di valle. L'approccio adottato per questo studio è stato quello di considerare valori costanti di portata associati a un determinato tempo di ritorno come condizioni al contorno di monte e una scala di deflusso come condizione al contorno di valle.

6.2.1.1 *Condizioni al contorno di monte: portata a bordi pieni*

Le simulazioni sono state effettuate con diversi valori di portata liquida, considerando comunque non una serie temporale ma un valore costante. Si è identificata come portata che meglio approssima quella a bordi pieni, per entrambi i tratti, la portata associata a un tempo di ritorno pari a 2 anni (T_2); si sono comunque effettuate simulazioni con valori nell'intorno di T_2 , in modo da verificare l'influenza del parametro sulla stima del trasporto solido (cfr. cap.7.1).

6.2.1.2 *Condizione al contorno di valle: scala di deflusso*

Le condizioni al contorno di valle imposte ai due modelli sono rappresentate da scale di deflusso calcolate sotto l'ipotesi di condizioni di deflusso teoriche di moto uniforme. Le scale di deflusso utilizzate nei due modelli sono riportate in Fig. 8 e Fig. 9.

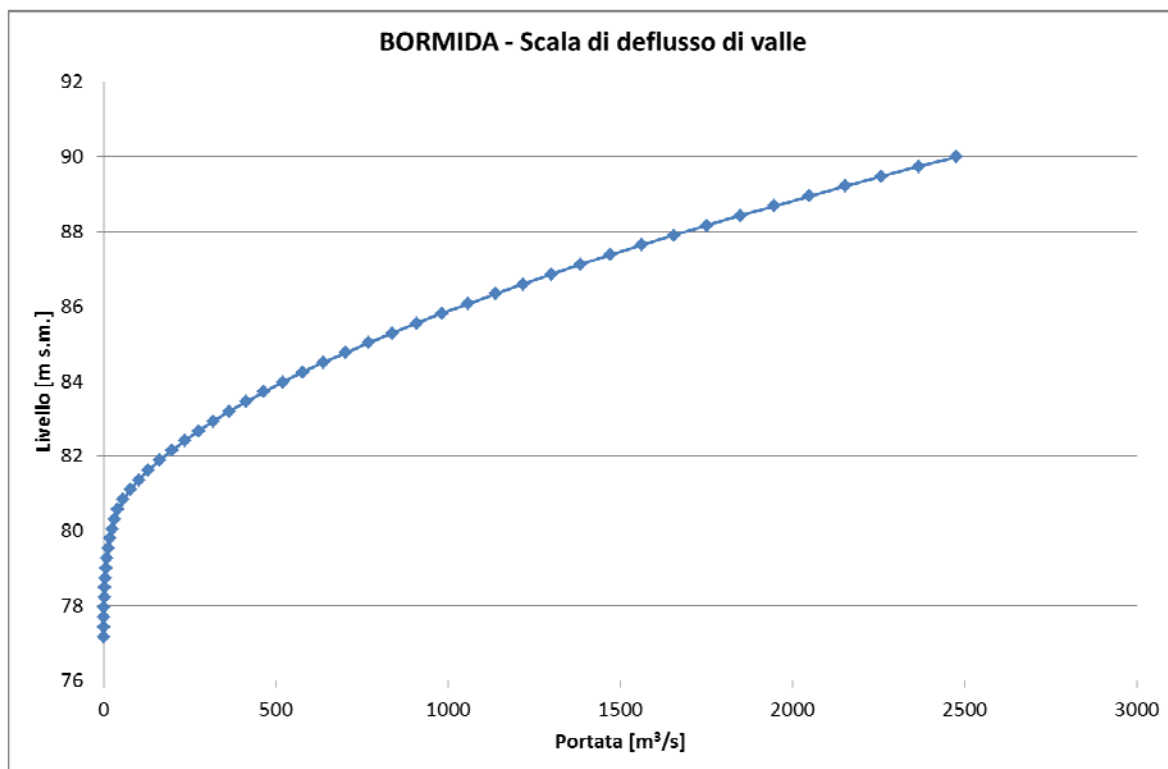


Fig. 8 Scala di deflusso posta come condizione al contorno di valle per il tratto della Bormida

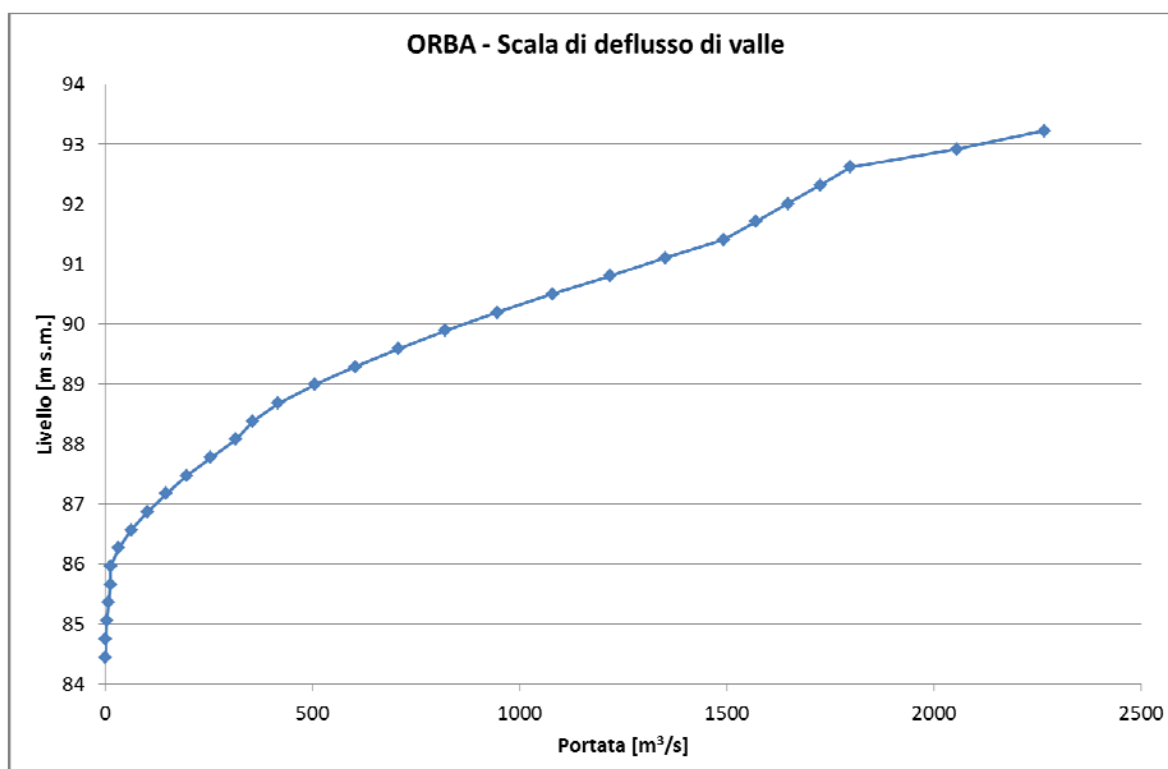


Fig. 9 Scala di deflusso posta come condizione al contorno di valle per il tratto dell'Orba

6.2.2 Caratteristiche del materiale

La definizione del diametro rappresentativo dei sedimenti presenti lungo i due tratti analizzati è stata eseguita sulla base di un rilievo granulometrico effettuato nel 2008 dal CNR-IRPI per conto dell'AIPO (Agenzia Interregionale per il Fiume Po). Per entrambi i corsi d'acqua il campionamento è stato effettuato presso due differenti sezioni: in corrispondenza degli abitati di Strevi e di Cassine (Cascina Boerio) per la Bormida e presso gli abitati di Rocca Grimalda e Casal Cermelli per quanto riguarda l'Orba. In quest'ultimo caso, sono stati effettuati due differenti campionamenti nella medesima sezione di Casal Cermelli, immediatamente a monte dell'attraversamento di via Frugarolo. In Fig. 10 e Fig. 11 sono riportati i punti di campionamento granulometrico effettuati rispettivamente sul tratto del fiume Bormida e del torrente Orba.

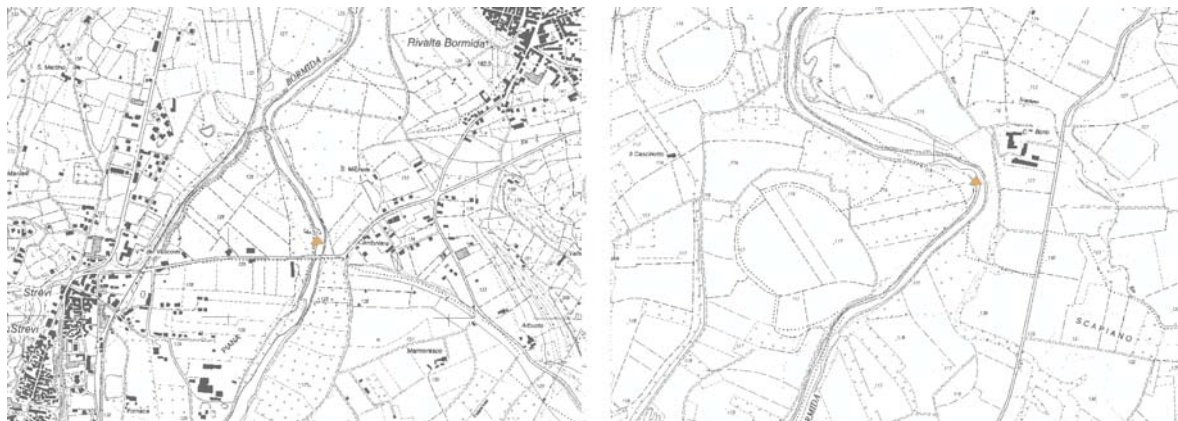


Fig. 10 Campionamenti granulometrici (triangolo ocra) sul fiume Bormida presso Strevi (sinistra) e Cassine-Cascina Boerio (destra)



Fig. 11 Campionamenti granulometrici (triangolo ocra) sul torrente Orba presso Rocca Grimalda (sinistra) e Casal Cermelli (destra)

La relativa scarsità di campionamenti ha comportato l'assunzione di determinate ipotesi al fine di associare un valore di diametro rappresentativo ad ogni tratto omogeneo. Come ipotesi di fondo si è assunta una relazione non lineare tra la pendenza del tratto e il diametro medio dei sedimenti. Tale relazione è stata ricavata calcolando la regressione in campo logaritmico tra d_{50} rilevato e relativa pendenza del tratto, e poi ritrasformando tramite l'applicazione di un esponenziale; i parametri della curva risultano dunque il coefficiente angolare e il termine noto della retta di interpolazione in campo logaritmico. Di seguito si riporta la formula utilizzata come relazione tra pendenza e d_{50} :

$$d50 = \exp(\alpha \cdot \ln(i) + \beta)$$

Dove:

α =coefficiente angolare della retta di regressione;

β =termine noto della retta di regressione;

i =pendenza del tratto.

In Fig. 12 e Tab. 3 si riporta la stima dei parametri di regressione per il fiume Bormida.

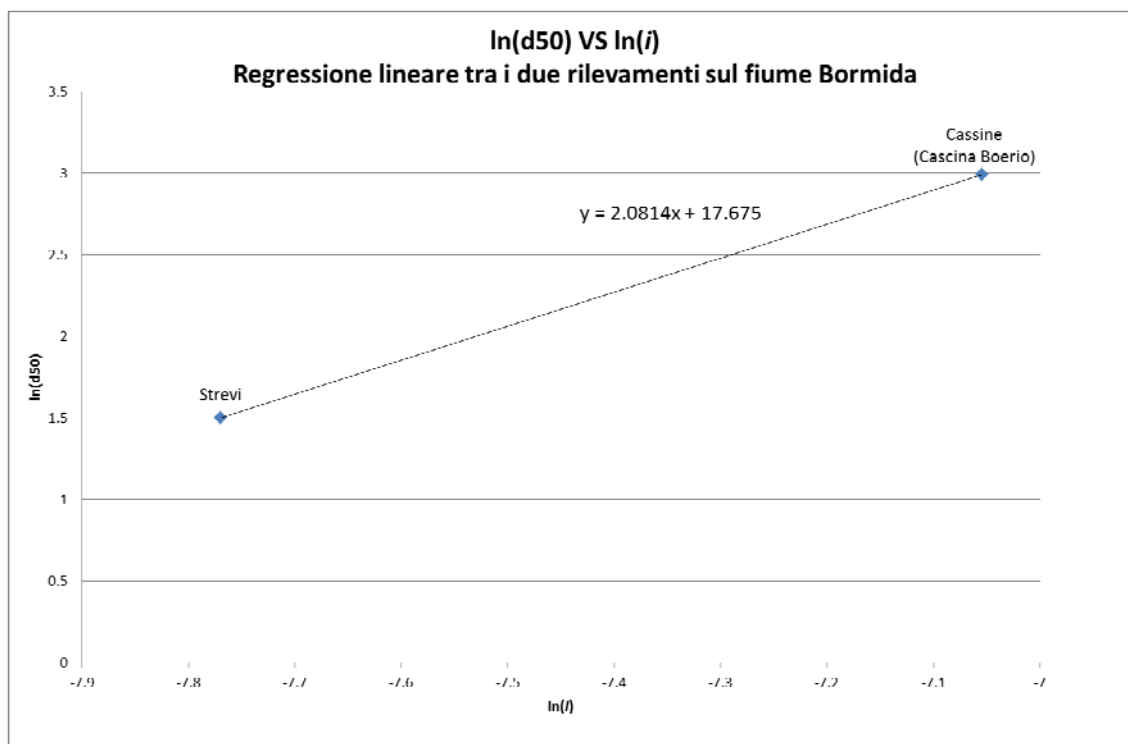


Fig. 12 Regressione lineare tra i valori logaritmici di d50 e pendenza associati ai due campionamenti sul fiume Bormida

Tab. 3 Valori assoluti e logaritmici di d50 e pendenza associati ai due punti di campionamento sulla Bormida e parametri della regressione lineare

Località	Pendenza	d50	ln(pendenza)	ln(d50)	Coefficiente angolare	Termine noto
	(m/m)	(mm)				
Strevi	0.000422	4.5	-7.770	1.5	2.0814	17.675
Cassine	0.000864	19.9	-7.054	3.0		

Il campionamento del torrente Orba ha necessitato una considerazione aggiuntiva rispetto alla Bormida. Come accennato in precedenza, il rilievo granulometrico di valle, presso l'abitato di Casal Cermelli, è stato svolto in due tempi, restituendo risultati di non trascurabile differenza: i due d50 rilevati sono risultati infatti pari a 13.15 mm (rilievo A in Fig. 11, immagine destra) e 4.22 mm (rilievo B). Per associare un valore unico di diametro rappresentativo, si è dunque tenuto in conto dei parametri di media e deviazione standard specifici dei due rilievi: nel caso del rilievo A, il valore di media è risultato pari a 14.46 mm

e deviazione standard pari a 2.34 mm, mentre il rilievo B ha restituito un valor medio di 3.96 mm e deviazione standard pari a 2.88 mm.

A seguito del rapporto deviazione standard/media significativamente più alto (indice di una maggiore incertezza del dato restituito) nel caso del rilievo B, si è scelto di associare al valore di d50 del rilievo A un peso doppio rispetto a quello associato al rilievo B. Di conseguenza il valore di d50 rilevati per la sezione di Casal Cermelli è stato calcolato pari a 10.55 mm. Il coefficiente angolare e termine noto della regressione sui valori logaritmici di pendenza e d50 per il tratto dell'Orba risultano così 0.5 e 5.5688, rispettivamente. Si fa inoltre notare come, ugualmente al fiume Bormida, anche nel caso dell'Orba i valori di d50 siano correlati positivamente alla pendenza (aumentano al crescere della stessa). L'analisi di regressione lineare per il tratto dell'Orba è illustrata in Fig. 13 e Tab. 4

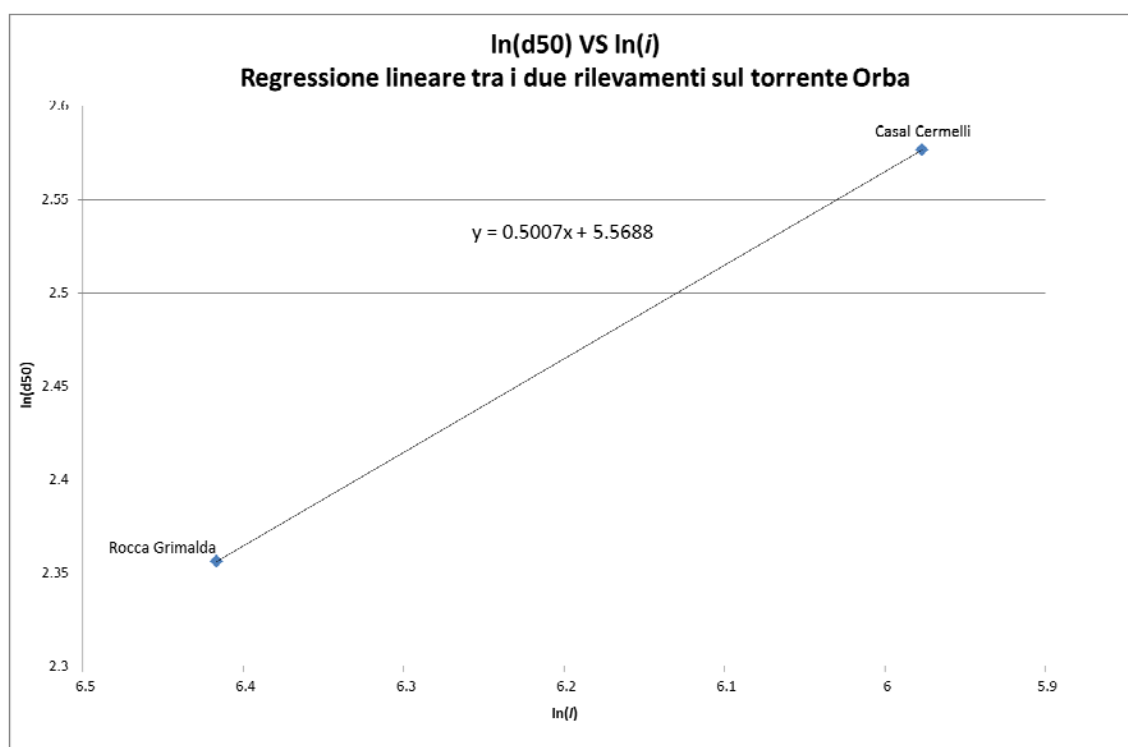


Fig. 13 Regressione lineare tra i valori logaritmici di d50 e pendenza associati ai due campionamenti sul fiume Orba

Tab. 4 Valori assoluti e logaritmici di d50 e pendenza associati ai due punti di campionamento sull'Orba e parametri della regressione lineare

Località	Pendenza	d50	$\ln(\text{pendenza})$	$\ln(d50)$	Coefficiente angolare	Termine noto
	(m/m)	(mm)				
Rocca Grimalda	0.0025	13.15	-5.9768	2.576421759	0.5	5.5688
Casal Cermelli	0.0016	10.5505	-6.41671	2.356173252		

Sulla base della relazione pendenza-d50 stimata, si sono determinati i diametri rappresentativi per ogni tratto omogeneo dei due corsi d'acqua in analisi. I valori così calcolati, dipendenti in modo esclusivo dalla pendenza del tratto, hanno richiesto un'operazione di "smoothing", così da rendere più omogenee le variazioni di d50 tra tratti adiacenti. Una correlazione eccessivamente stretta con la pendenza è irrealistica, in

quanto bene o male il corso d'acqua si comporta come un nastro trasportatore e, se in un settore di esso sono presenti, ad esempio, dei ciottoli (si veda il caso del tratto BO04200), salvo casi particolari di riesumazione di livelli fossili tutti da dimostrare, tali ciottoli debbono bene o male essere transitati da monte e, almeno in parte, debbono essere smaltiti verso valle. Inoltre, il fatto di ipotizzare la presenza di sedimenti strettamente correlati con la pendenza del profilo di fondo significa, di fatto, imporre al modello condizioni fortemente stabilizzanti, tutt'altro che dimostrate e per nulla cautelative in relazione agli obbiettivi del presente studio. E' per tali ragioni che in questi casi sarebbe preferibile disporre di una rete di punti di campionamento più fitta e statisticamente rappresentativa.

Tale operazione di omogeneizzazione è stata ottenuta calcolando il nuovo d50 attraverso una media dei tratti vicini, pesando maggiormente i valori ottenuti da campionamento. In tal modo si sono ottenuti i valori di d50 per la Bormida, riportati in Fig. 14 e graficati in Tab. 5 e per l'Orba, Fig. 15 e Tab. 6.

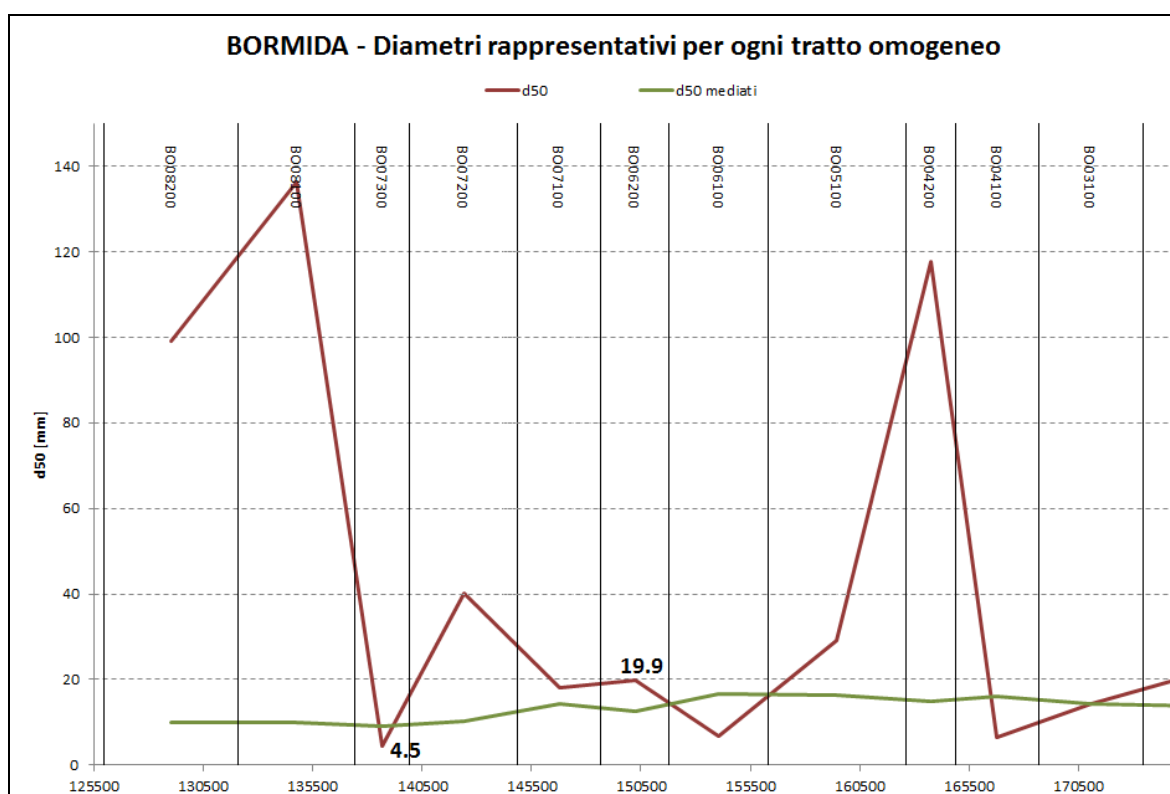


Fig. 14 Valori di d50 (linea granata) e d50 mediati (linea verde) per ogni tratto omogeneo del fiume Bormida. I valori in grassetto sul grafico sono quelli derivanti da rilievo granulometrico

Tab. 5 Valori di d50 e d50 mediati per ogni tratto omogeneo del fiume Bormida. I valori in rosso sono quelli derivanti da rilievo granulometrico. In grigio si riportano i valori (costanti in quanto ipotizzati) per i tratti il cui fondo è caratterizzato da affioramenti rocciosi

Tratto	d50	d50 med hp3
	(mm)	(mm)
BO08200	99.2	10.0
BO08100	136.3	10.0
BO07300	4.5	9.1
BO07200	40.1	10.3
BO07100	18.2	14.3
BO06200	19.9	12.5
BO06100	6.7	16.6
BO05100	29.2	16.3
BO04200	117.6	14.8
BO04100	6.4	16.1
BO03100	14.3	14.2
BO02100	22.4	13.8
BO01100	10.7	13.8

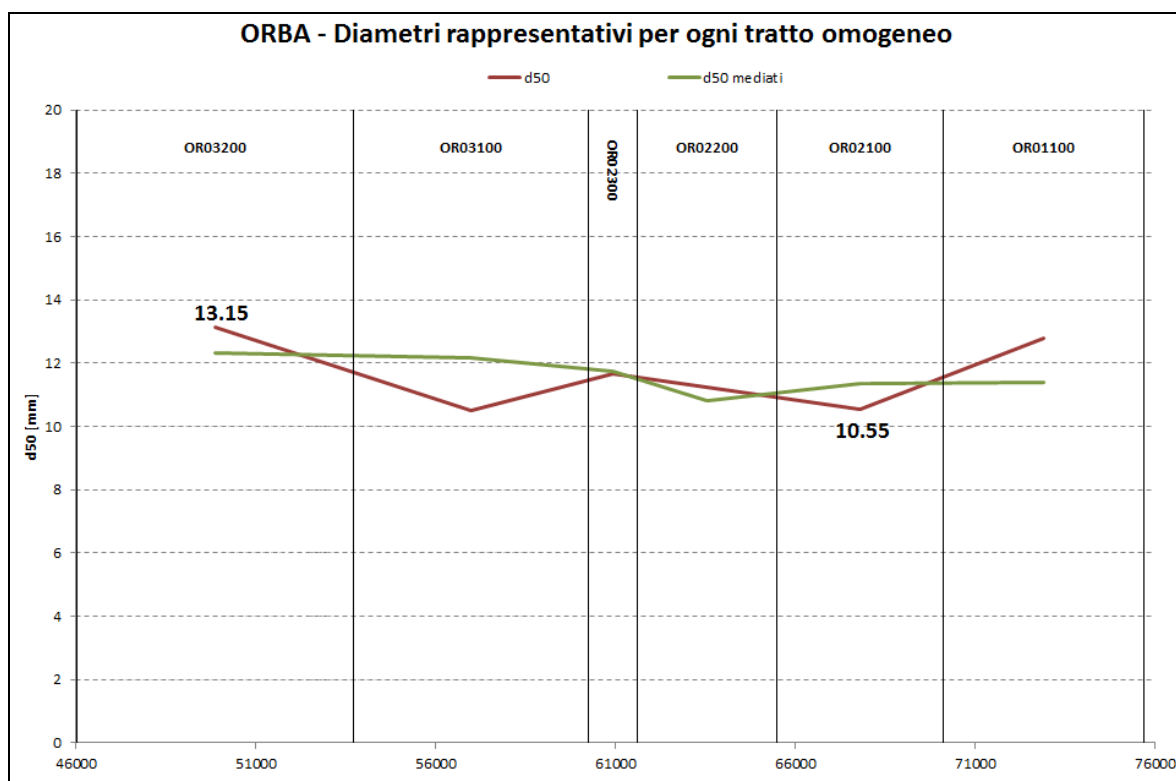


Fig. 15 Valori di d50 (linea granata) e d50 mediati (linea verde) per ogni tratto omogeneo del torrente Orba. I valori in grassetto sul grafico sono quelli derivanti da rilievo granulometrico

Tab. 6 Valori di d_{50} e d_{50} mediati per ogni tratto omogeneo del torrente Orba. I valori in rosso sono quelli derivanti da rilievo granulometrico

Tratto	d_{50}	d_{50} mediati
	(mm)	(mm)
OR03200	13.1	12.3
OR03100	10.5	12.2
OR02300	11.7	11.8
OR02200	11.2	10.8
OR02100	10.5	11.4
OR01100	12.8	11.4

Dai dati riportati nelle figure precedenti si osserva come i diametri rappresentativi stimati per il tratto della Bormida varino tra 10 e 16 mm.

I valori fortemente concentrati attorno a 11-12 mm per il d_{50} dell'Orba hanno portato ad assumere un valore unico per l'intero tratto indagato, tenuto conto che le differenze sui singoli tratti sono nettamente inferiori al potenziale errore di misura connesso ai rilievi e campionamenti in sito delle granulometrie. Di conseguenza, si è associato all'intero tratto dell'Orba un d_{50} pari a 11 mm.

6.2.3 Portata liquida: analisi di sensitività

Parametro di cruciale importanza nella modellazione è la portata liquida fornita al modello di calcolo come condizione al contorno di monte. Sulla base dell'analisi delle serie storiche disponibili per le stazioni di misura idrometrica presenti lungo i tratti in esame, si sono calcolati i valori di portata associati a diversi tempi di ritorno. Poiché la portata formativa tradizionalmente considerata per la stima del trasporto solido fluviale può essere considerata approssimativamente pari a quella a bordi pieni, i tempi di ritorno considerati per tale analisi sono piuttosto bassi, ovvero: 2 (T2), 5 (T5) e 10 anni (T10). Le valutazioni che hanno portato alla definizione delle portate associate ai tempi di ritorno indicati sono illustrate in dettaglio all'interno del rapporto 04_01_01R.

Per entrambi i corsi d'acqua esaminati la portata associata a un tempo di ritorno di 2 anni (T2) è risultata la più corretta nell'approssimare quella a bordi pieni. L'identificazione della portata più prossima a quella a bordi pieni è avvenuta tramite l'utilizzo del modello idrodinamico.

Le tre portate considerate (T=2, 5 e 10 anni) sono state utilizzate come input al modello per determinare il livello di pelo libero nelle varie sezioni associate a ognuna delle tre portate. Si è così verificato come la portata T10 comporti un deflusso che risulta interessante nella quasi totalità delle sezioni le aree laterali di golena per entrambi i tratti indagati. La portata T5 determina ancora in numerose sezioni un'altezza di pelo libero superiore agli argini di alveo attivo, mentre la T2 risulta essere contenuta in alveo nella grande maggioranza delle sezioni trasversali. In Fig. 16 e Fig. 17 si riportano alcune sezioni del modello idrodinamico della Bormida e dell'Orba con l'altezza del pelo libero associata alla portata T2: nei casi riportati, rappresentativi della maggioranza delle sezioni, il deflusso comporta un pelo libero poco al di sotto della quota delle rive di alveo attivo.

Al fine di verificare l'effetto sui risultati di un cambiamento nella portata liquida in ingresso, si è effettuata un'analisi di sensitività su tale parametro, considerando valori di portata nell'intorno della T2. Si è scelto di considerare le seguenti portate, in aggiunta alla T2: il 75% della T2, il 125% della T2, e la portata con tempo di ritorno T=5 anni (T5). In Tab. 7 sono riportati i valori di portata utilizzati per l'analisi: a causa della significativa lunghezza

dei tratti, la portata è stata calcolata in diverse sezioni in modo da tenere in conto l'aumento dei valori verso valle.

Tab. 7 Valori di portata utilizzati per l'analisi di sensitività per le sezioni della Bormida e dell'Orba

	Sezioni	Progressiva [m]	Portata [m³/s]			
			75% T2	T2	125% T2	T5
Bormida	Acqui Terme	125969	368	490	613	1060
	Strevi	134918	548	730	913	1250
	Cassine	143280	68	910	1138	1390
	Sezzadio	158894	758	1010	1263	1490
	Castellazzo Bormida	164869	826	1100	1376	1580
	Alessandria	175849	931	1240	1551	1790
Orba	Silvano d'Orba	46026	525	700	875	1010
	Predosa	58621	563	750	938	1080
	Fresonara	60187	608	810	1013	1170
	Confluenza Bormida	75037	623	830	1038	1210

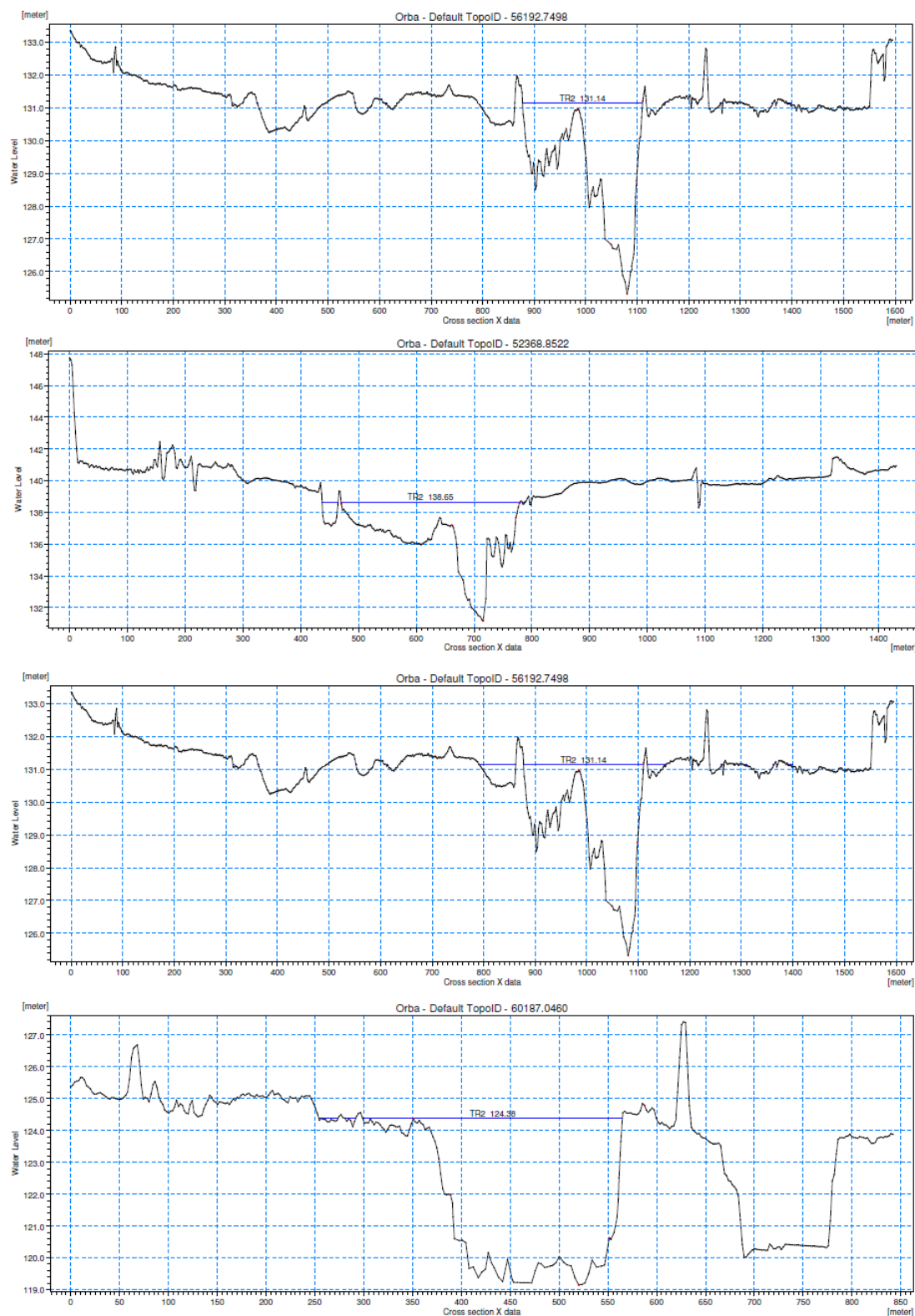


Fig. 16 Livelli di pelo libero associate a T=2 anni per il torrente Orba

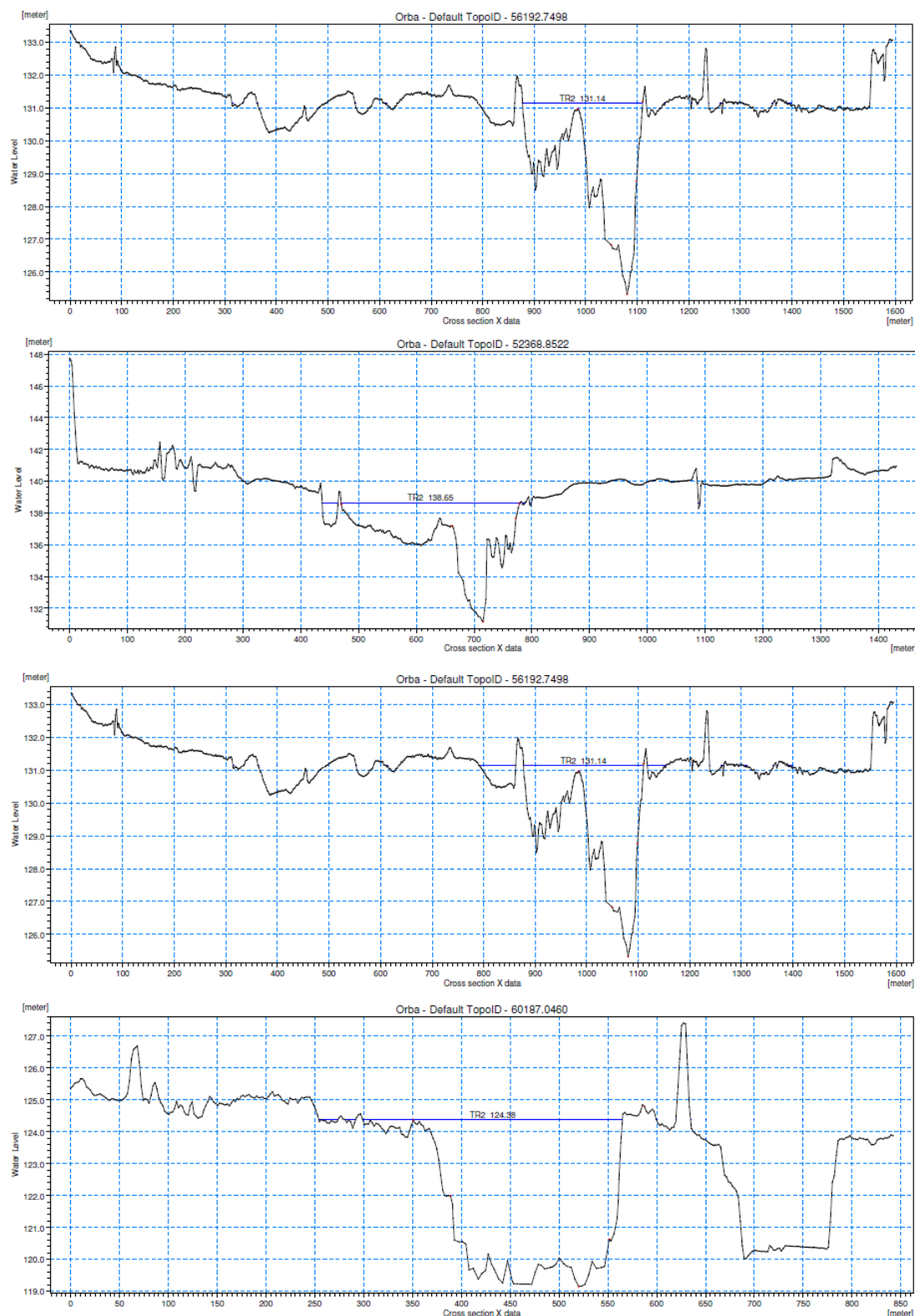


Fig. 17 Livelli di pelo libero associate a T=2 anni per il fiume Bormida

7 MODELLAZIONE A FONDO FISSO

Per i due tratti considerate nel presente studio, come accennato precedentemente, si è considerata una configurazione a fondo fisso per la modellazione ST. Sotto tale ipotesi, il

modello calcola la portata solida in base alla capacità di trasporto della sezione, in funzione della portata liquida e del diametro dei sedimenti.

La modellazione è stata effettuata per 4 diverse portate liquide, prossime alla portata a bordi pieni, e considerando 3 differenti equazioni di calcolo della portata solida. Ciò ha consentito di confrontare diversi risultati in modo da identificare la configurazione migliore (in termini di verosimiglianza e stabilità del risultato) su uno spettro piuttosto ampio di alternative.

7.1 Effetti indotti dalla variazione di portata

In Fig. 18 e Fig. 19 sono graficati a titolo di esempio i valori di trasporto solido al variare della portata liquida in ingresso per i due tratti in esame, per una sola delle 3 formulazioni considerate (Smart-Jaeggi). Dai grafici risulta chiaro come una perturbazione della portata liquida comporti una variazione all'incirca proporzionale del trasporto solido. Tale conclusione è confortata dall'analisi dei valori (mediati sui tratti omogenei) associati a tutte e tre le equazioni di trasporto solido utilizzate, riportati in Tab. 8 e Tab. 9. Per una più agevole valutazione dei cambiamenti nella capacità di trasporto solido associati alla variazione della portata di input, in Tab. 10 e Tab. 11 sono riportati, per ognuno dei tre metodi di calcolo considerati, la differenza tra i valori di Q_s associati alla portata liquida T5 e quelli associati alla portata 75% T2 relativi ai tratti della Bormida e dell'Orba rispettivamente.

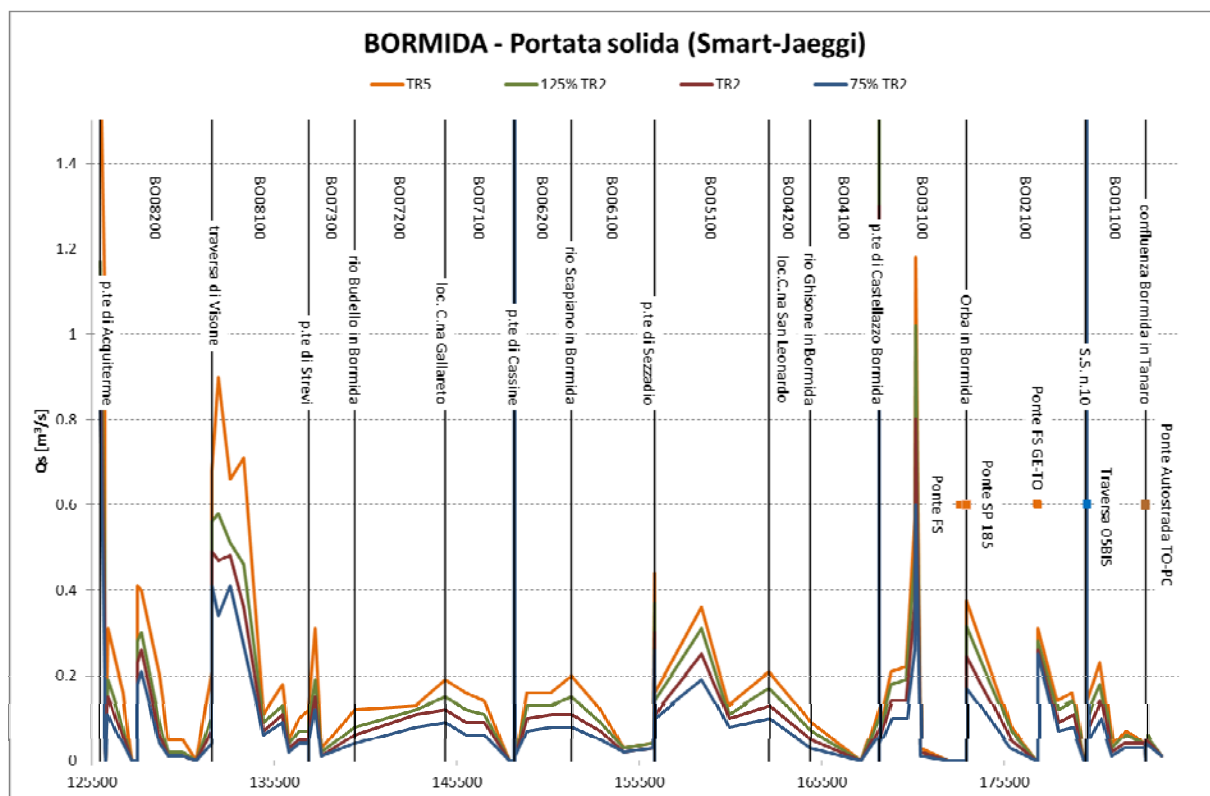


Fig. 18 Valori di trasporto solido per diversi valori di portata liquida per il fiume Bormida

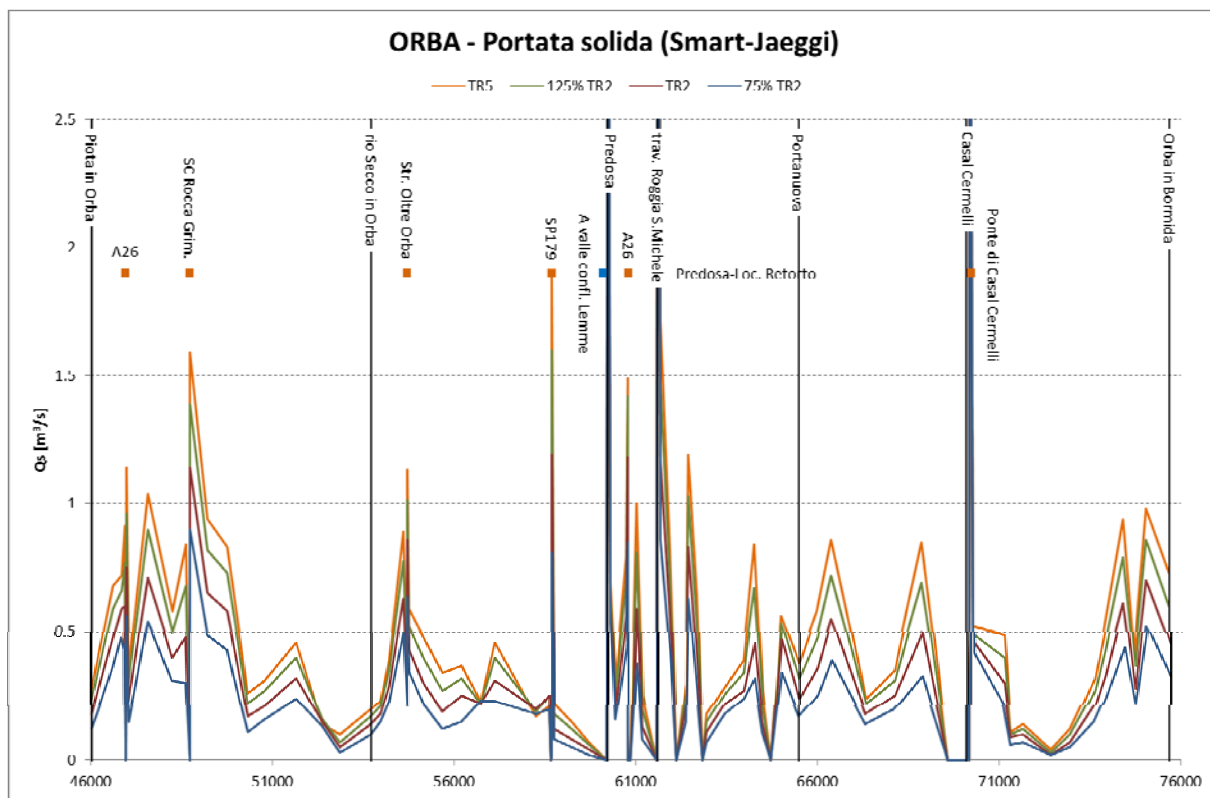


Fig. 19 Valori di trasporto solido per diversi valori di portata liquida per il torrente Orba

Tab. 8 Valori di trasporto solido mediati sui tratti omogenei per il tratto della Bormida, secondo le tre formulazioni considerate

BORMIDA													
		Engelund-Fredsoe				Engelund-Hansen				Smart-Jaeggi			
Tratto	d50	Qsolida [m³/s]				Qsolida [m³/s]				Qsolida [m³/s]			
	[m]	75% R2	TR2	125% TR2	TR5	75% TR2	TR2	125% TR2	TR5	75% TR2	TR2	125% TR2	TR5
BO08200	0.01	0.22	0.30	0.40	0.87	0.27	0.44	0.65	1.66	0.09	0.11	0.14	0.23
BO08100	0.01	0.43	0.50	0.57	0.73	0.78	1.13	1.51	2.69	0.18	0.22	0.27	0.38
BO07300	0.009	0.23	0.32	0.40	0.55	0.31	0.46	0.66	1.34	0.04	0.05	0.07	0.11
BO07200	0.010	0.33	0.45	0.53	0.59	0.46	0.67	0.89	1.33	0.07	0.09	0.11	0.14
BO07100	0.014	0.33	0.58	0.67	0.76	0.56	0.85	1.20	1.71	0.05	0.07	0.09	0.12
BO06200	0.013	0.25	0.39	0.48	0.64	0.52	0.67	0.80	1.00	0.20	0.20	0.19	0.21
BO06100	0.017	0.14	0.20	0.31	0.44	0.23	0.34	0.50	0.68	0.04	0.06	0.07	0.09
BO05100	0.016	0.33	0.54	0.67	0.74	0.51	0.76	1.02	1.32	0.12	0.16	0.19	0.22
BO04200	0.015	0.14	0.22	0.32	0.44	0.25	0.41	0.61	0.85	0.07	0.09	0.12	0.15
BO04100	0.016	0.15	0.21	0.27	0.33	0.26	0.38	0.52	0.63	0.02	0.03	0.04	0.06
BO03100	0.014	0.43	0.68	0.99	1.15	0.68	1.10	1.61	1.97	0.09	0.12	0.16	0.19
BO02100	0.014	0.36	0.43	0.42	0.43	0.53	0.59	0.65	0.72	0.06	0.07	0.09	0.11
BO01100	0.014	0.11	0.19	0.26	0.32	0.20	0.33	0.46	0.55	0.04	0.05	0.07	0.08

Tab. 9 Valori di trasporto solido mediati sui tratti omogenei per il tratto dell'Orba, secondo le tre formulazioni considerate

ORBA													
		Engelund-Fredsoe				Engelund-Hansen				Smart-Jaeggi			
Tratto	d50	Q _{solida} [m³/s]				Q _{solida} [m³/s]				Q _{solida} [m³/s]			
	[m]	75% TR2	TR2	125% TR2	TR5	75% TR2	TR2	125% TR2	TR5	75% TR2	TR2	125% TR2	TR5
OR03200	0.011	0.87	1.23	1.56	1.77	1.07	1.66	2.36	2.99	0.27	0.36	0.45	0.52
OR03100	0.011	0.63	0.85	1.04	1.15	0.84	1.23	1.68	2.07	0.21	0.26	0.31	0.34
OR02300	0.011	0.36	0.61	0.82	1.08	0.85	1.23	1.69	2.11	0.39	0.48	0.57	0.65
OR02200	0.011	0.67	0.94	1.28	1.46	1.22	1.94	2.58	3.10	0.23	0.31	0.40	0.46
OR02100	0.011	0.86	1.23	1.43	1.57	1.05	1.72	2.56	3.29	0.20	0.28	0.37	0.44
OR01100	0.011	0.75	1.05	1.29	1.43	1.07	1.64	2.33	2.95	0.25	0.33	0.40	0.47

Tab. 10 Differenza tra portata solida associata a T5 e portata solida associata a 75% T2 per la Bormida, secondo le tre formulazioni considerate

BORMIDA				
Tratto	d50	$\Delta Q_{solida} (Q_{T5}-Q_{75\% T2}) [m³/s]$		
	[m]	EF	EH	SJ
BO08200	0.01	0.65	1.39	0.15
BO08100	0.01	0.31	1.92	0.20
BO07300	0.009	0.32	1.03	0.07
BO07200	0.010	0.26	0.87	0.07
BO07100	0.014	0.42	1.15	0.07
BO06200	0.013	0.38	0.48	0.01
BO06100	0.017	0.31	0.46	0.05
BO05100	0.016	0.42	0.81	0.10
BO04200	0.015	0.31	0.60	0.09
BO04100	0.016	0.18	0.37	0.03
BO03100	0.014	0.72	1.29	0.10
BO02100	0.014	0.08	0.20	0.05
BO01100	0.014	0.21	0.36	0.04

Tab. 11 Differenza tra portata solida associata a T5 e portata solida associata a 75% T2 per l'Orba, secondo le tre formulazioni considerate

ORBA				
Tratto	d50	$\Delta Q_{solida} (Q_{T5}-Q_{75\% T2}) [m³/s]$		
	[m]	EF	EH	SJ
OR03200	0.011	0.90	1.93	0.25
OR03100	0.011	0.52	1.22	0.13
OR02300	0.011	0.72	1.27	0.26
OR02200	0.011	0.79	1.88	0.23
OR02100	0.011	0.72	2.24	0.24
OR01100	0.011	0.68	1.87	0.21

Come accennato in precedenza (cfr. par. 6.2.3) la portata liquida è stata scelta essere quella con tempo di ritorno due anni, ovvero che meglio approssima quella a bordi pieni. A seguito dell'analisi dell'andamento del trasporto solido stimato nell'intorno di tale portata, si è verificato come esso risulti crescente in maniera "graduale" con la portata liquida: questo ha consentito di escludere che la portata scelta fosse prossima a un punto di instabilità del sistema. Le Tab. 15 e Tab. 16 contengono i valori di trasporto solido e portata liquida T2 per ogni sezione dei due modelli.

72 Effetti della scelta della formulazione di calcolo del trasporto solido

A valle della definizione della portata liquida di input, si sono analizzati i risultati forniti dalle formulazioni di trasporto solido considerate, ovvero Engelund-Fredsoe (EF), Engelund-Hansen (EH) e Smart-Jaeggi (SJ). In Fig. 20 e Fig. 21 sono graficati i valori per la Bormida del trasporto solido rispettivamente per ogni sezione e mediati per tratto omogeneo secondo le 3 formule considerate; analoghi grafici relativi al torrente Orba sono riportati in Fig. 22 e Fig. 23.

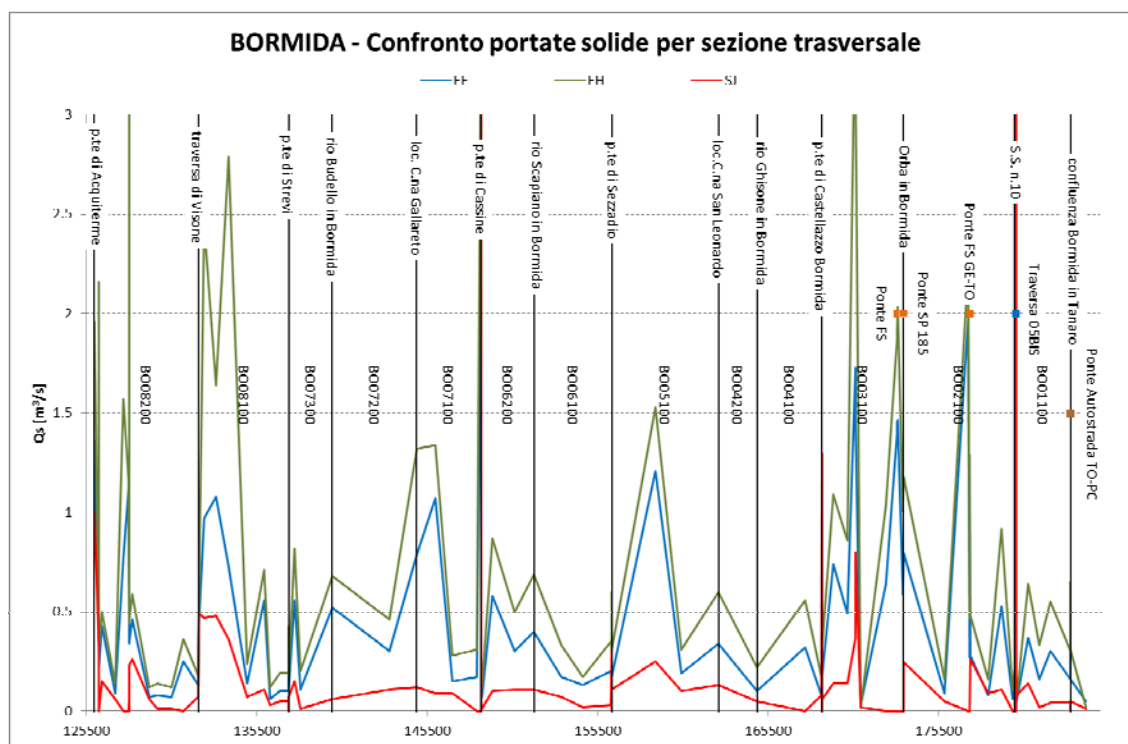


Fig. 20 Valori di portata solida per sezione per il tratto della Bormida, secondo le 3 formulazioni considerate

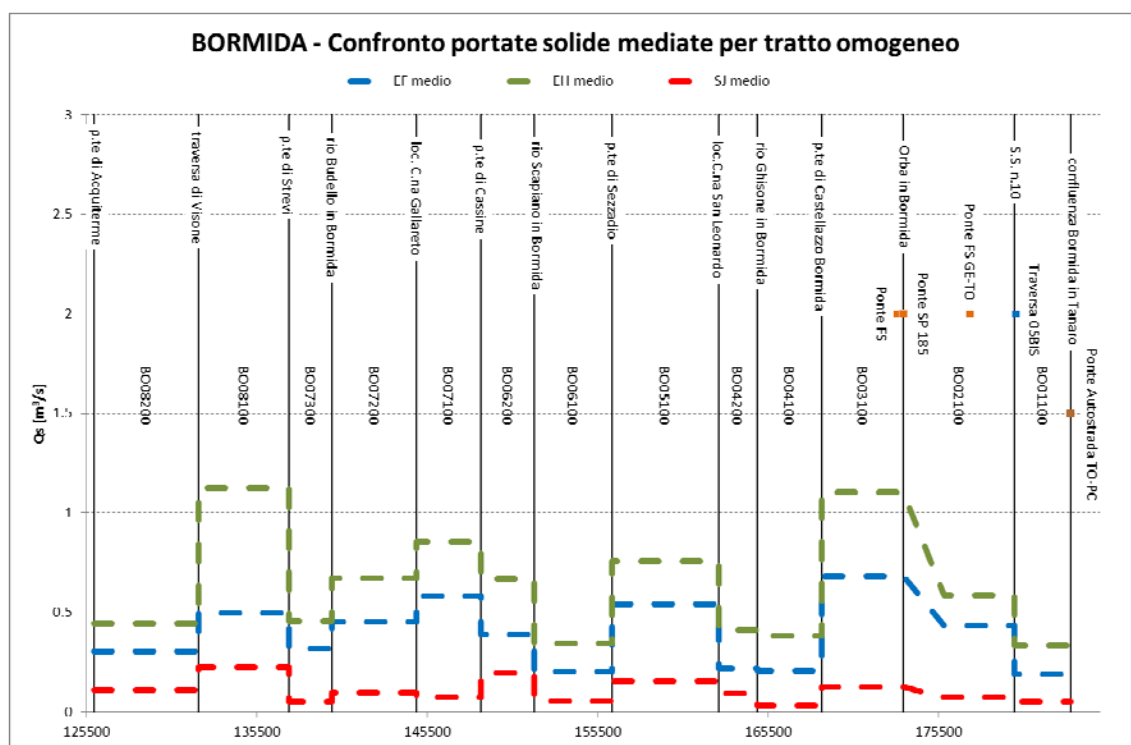


Fig. 21 Valori di portata solida mediata per tratto omogeneo per il tratto della Bormida, secondo le 3 formulazioni considerate

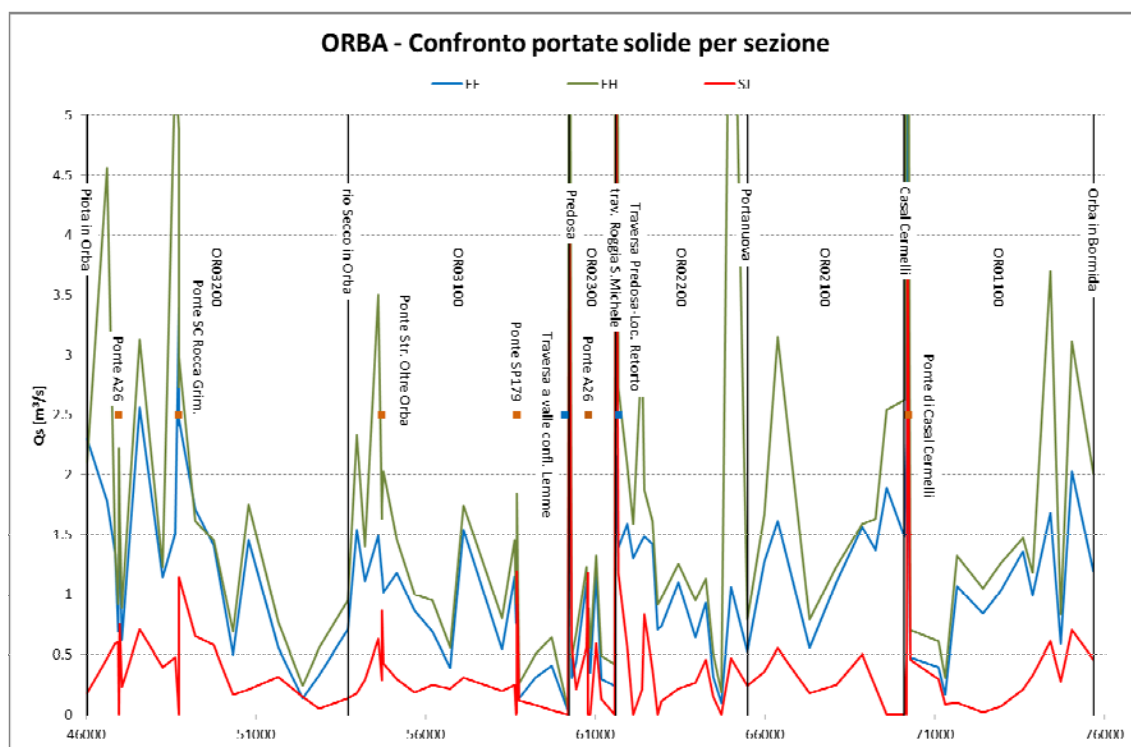


Fig. 22 Valori di portata solida per sezione per il tratto dell'Orba, secondo le 3 formulazioni considerate

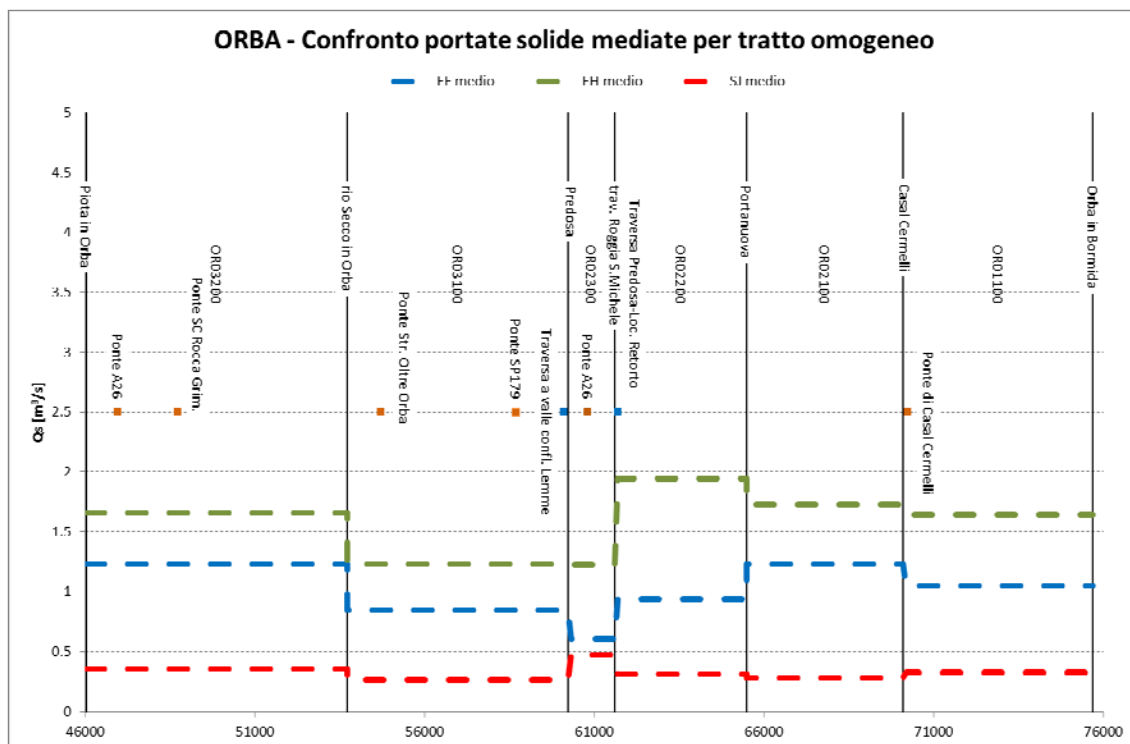


Fig. 23 Valori di portata solida mediata per tratto omogeneo per il tratto dell'Orba, secondo le 3 formulazioni considerate

I valori illustrati nelle figure precedenti mostrano come, in termini di valori mediati sui tratti omogenei, il trasporto solido stimato risulti ragionevolmente simile, per quanto comunque le diverse formulazioni restituiscano differenze non trascurabili.

Per entrambi i tratti, e per tutti i tratti omogenei, l'equazione di SJ restituisce i valori più bassi, mentre il trasporto solido maggiore viene stimato dalla formula di EH. Nel caso della Bormida, infatti, il trasporto solido secondo EH risulta compreso all'incirca tra 0.3 e 1.1 m³/s, mentre SJ comporta valori massimi intorno a 0.2 m³/s. Il trasporto solido secondo EF, infine, risulta compreso tra 0.2 e 0.7 m³/s. Valori di intensità superiore ma in proporzione simili vengono dalla modellazione del tratto dell'Orba.

Analizzando i valori di portata solida per sezione, si evince come i picchi di portata si registrino di norma in corrispondenza di strutture trasversali (traverse o attraversamenti), e tale comportamento risulta comune ai tre metodi di calcolo, in relazione alle maggiori velocità di deflusso calcolate a valle delle strutture. Per quanto riguarda i valori mediati per tratto omogeneo, è interessante notare come per il tratto della Bormida le tre formulazioni restituiscano andamenti tendenzialmente analoghi sui vari tratti: di conseguenza, le tre linee appaiono riscalate l'una rispetto all'altra. Discorso diverso invece per quanto riguarda l'Orba, per il quale il metodo SJ pare comportare valori medi con andamento generalmente speculare rispetto alle altre due formulazioni.

L'analisi delle uscite dei vari modelli utilizzati spinge a considerare meno affidabile in quanto tendente a sovrastimare il trasporto solido il modello EH, per quanto le differenze rispetto al modello EF non siano drastiche (tipo un ordine di grandezza), ma tali comunque da ritenerlo non adeguato al tipo di processo di trasporto che caratterizza i due tratti in esame. Per quanto riguarda i modelli EF e SJ, entrambi si ritengono utilizzabili nel presente caso: su questo particolare aspetto, comunque, una modellazione più raffinata, basata su uno schema di calcolo a fondo mobile potrebbe fornire ulteriori elementi valutativi.

7.3 Integrazione: modellazione a fondo fisso tratto di monte del torrente Orba e Stura di Ovada

In aggiunta ai tratti della Bormida e dell'Orba sin qui illustrati, si è proceduto a realizzare la modellazione del trasporto solido a fondo fisso per un tratto del torrente Orba a monte di quello già simulato, comprensivo della parte terminale di un tributario in destra, la Stura di Ovada.

Il tratto considerato del torrente Orba si estende per una lunghezza circa pari a 15250 m, dalla località di Castel Cerreto sino alla confluenza col Piota, a circa 500 m a valle dell'abitato di Ovada. Gli ultimi 2 km circa del tratto simulato, da Rocca Ripalta sino alla confluenza col Piota, sono in sovrapposizione con la modellazione precedente.

Analogamente al modello illustrato nei capitoli precedenti, anche nel caso presente il tratto di studio è stato differenziato in sottotratti, in funzione della loro omogeneità dal punto di vista della natura del suolo. Si sono così identificati 4 tratti omogenei per l'Orba e 2 per la Stura di Ovada (cfr. documento 03-01-01R):

- Orba:
 - Castel Cerreto a Molare (soglia in località Battagliosi): 2713 m;
 - Molare (soglia in località Battagliosi) a Ovada (ponte SP204): 5404 m;
 - Ovada, dal ponte SP204 alla confluenza con la Stura di Ovada: 1820 m;
 - Confluenza con la Stura alla confluenza con il Piota: 5329 m.
- Stura di Ovada:
 - Ponte FFSS al ponte Ovada-Belforte: 656 m;
 - Ponte Ovada-Belforte alla confluenza in Orba: 3571 m.

Le portate liquide utilizzate come condizioni al contorno di monte e come input localizzati lungo l'asta del corso d'acqua per tenere in conto del contributo dei bacini laterali sono quelle relative a tempi di ritorno pari a 2 (T2) e 5 anni (T5). Come già evidenziato in precedenza (cfr. par. 3.2.3), la portata T2 risulta quella che meglio approssima la portata a bordi pieni (assunta come identificativa di quella formativa), mentre la portata T5 è stata considerata principalmente come termine di confronto rispetto alla T2, rappresentando così una sorta di analisi di sensitività sulla portata liquida, per quanto semplificata. In tabella 12 si riportano i valori di portata liquida associati a T2 e T5 per i tratti considerati.

Tab. 12 Valori di portata liquida per le sezioni dell'Orba di monte e della Stura di Ovada, per tempi di ritorno pari a 2 e 5 anni

	Sezioni	Progressiva [m]	Portata [m³/s]	
			T2	T5
Orba	Loc. Albereto	32978	510	730
	Loc. Belletto	40561	540	770
	Confluenza Stura	43260	650	930
	Silvano d'Orba	46027	1010	1010
Stura di Ovada	Ponte FFSS	1	110	160

In relazione ai diametri rappresentativi del sedimento per tratto si sono mantenuti i parametri di regressione illustrati nel paragrafo 3.2.2 e riportati nelle tabelle 1 e 2. Come per il modello precedente, anche in questo caso i valori di d_{50} risultanti dall'applicazione della formula (funzione della pendenza del tratto) sono stati sottoposti a un'operazione di "smoothing" in modo da renderli più omogenei lungo la longitudinale e dunque realistici.

Tab. 13 Valori di d_{50} mediati per ogni tratto omogeneo dell'Orba di monte e della Stura di Ovada.

	Cod. Tratto	d_{50}
	(-)	[m]
ORBA	OR05300	0.040
	OR05200	0.032
	OR05100	0.020
	OR04100	0.014
STURA	SO2100	0.040
	SO1100	0.020

Per ogni tratto, si è dunque proceduto alla stima del trasporto solido potenziale: in quanto la configurazione di simulazione è a fondo fisso, infatti, il valore ottenuto rispecchia la capacità di trasporto della sezione, senza tenere in conto l'eventuale fenomeno erosivo o di deposizione sulla quota altimetrica dell'alveo.

A seguito delle analisi illustrate nei capitoli precedenti, si è ritenuta la formulazione di Smart-Jaeggi la più affidabile per modellare il processo di trasporto nei tratti in esame: di conseguenza, esclusivamente tale metodo è stato utilizzato per la stima della portata solida riportata nelle figure e nella tabella seguenti.

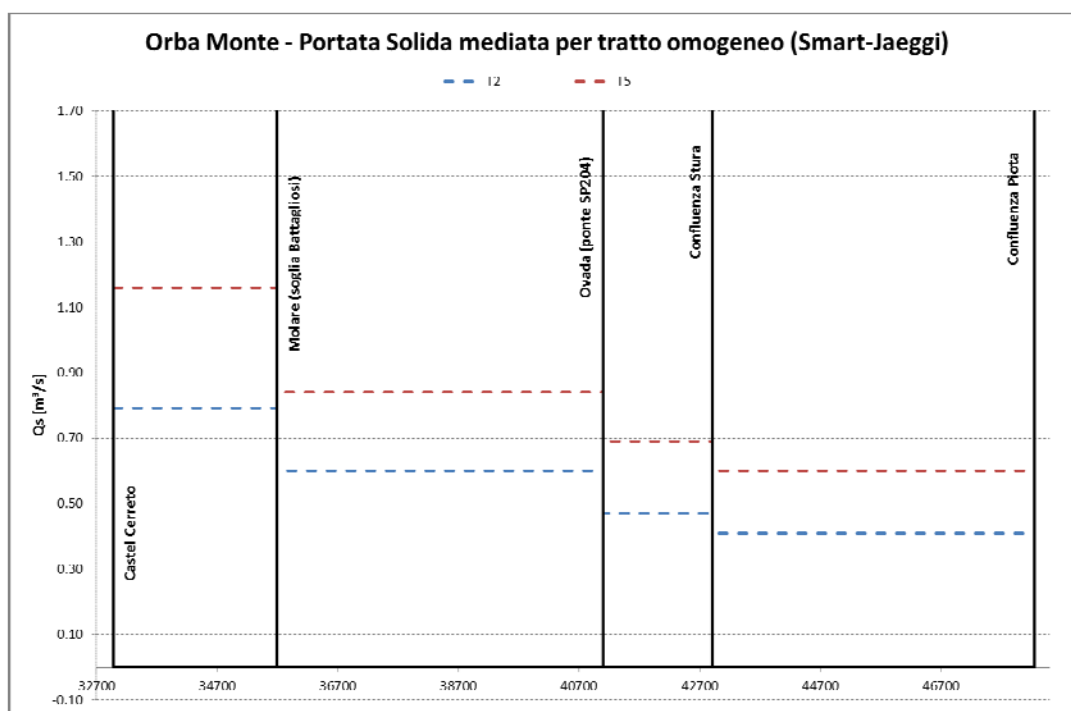


Fig. 24 Valori di portata solida mediata per tratto omogeneo per il tratto di monte dell'Orba per portate liquide pari a T2 e T5

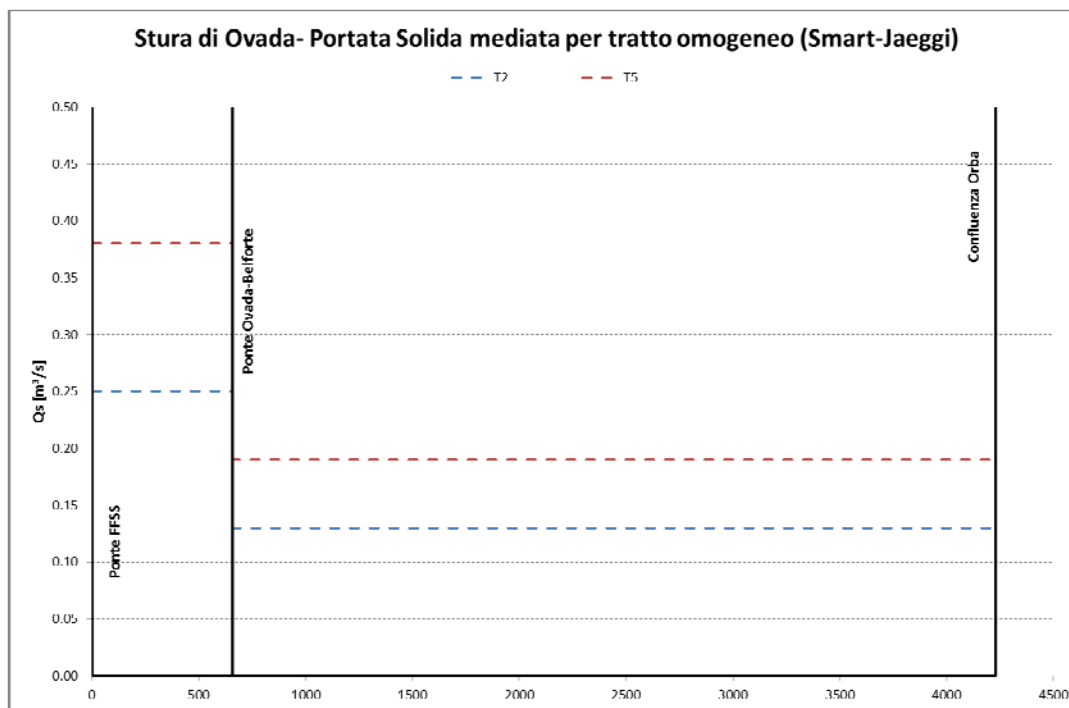


Fig. 25 Valori di portata solida mediata per tratto omogeneo per il tratto della Stura di Ovada per portate liquide pari a T2 e T5

Tab. 14 Valori di portata solida mediati per ogni tratto omogeneo dell'Orba di monte e della Stura di Ovada per T2 e T5

			SMART-JAEGGI	
	Cod. Tratto	d ₅₀	Qs media T2	Qs media T5
	(-)	[m]	[m³/s]	[m³/s]
ORBA	OR05300	0.040	0.79	1.16
	OR05200	0.032	0.6	0.84
	OR05100	0.020	0.47	0.69
	OR04100	0.014	0.41	0.6
STURA	SO2100	0.040	0.25	0.38
	SO1100	0.020	0.13	0.19

Dall'analisi dei risultati, in particolar modo relativi al torrente Orba, si evince come il trasporto solido risulti diminuire in maniera graduale da monte verso valle. Il tratto di monte dell'Orba, infatti, presenta un costante andamento decrescente dei valori di portata solida che comportano, per quanto riguarda la portata liquida T2, una diminuzione del trasporto solido (mediato) da 0.85 m³/s del tratto OR05300 a 0.42 m³/s dell'ultimo tratto, circa 15 km a valle del primo. La T5 invece comporta valori decrescenti da 1.23 m³/s a 0.61 m³/s, con un incremento rispetto ai valori associati a T2 oscillante tra il 40% e il 50%

Per quanto riguarda il segmento della Stura di Ovada, il trasporto nel tratto di monte risulta pari a 0.28 m³/s per poi scendere a 0.14 m³/s, considerando una diametro rappresentativo dei sedimenti costante pari a 0.014 m. Anche nel caso della Stura, la portata liquida cinquennale comporta incrementi del trasporto solido circa pari al 45%.

8 ANALISI DEI RISULTATI

Nelle tabelle seguenti sono riportate tutte le grandezza calcolate dal modello nella configurazione a fondo fisso e con portata liquida a quella associata al tempo di ritorno di 2 anni per entrambi i tratti indagati.

In particolare per ogni sezione di calcolo del modello (sezioni topografiche di rilievo) è riportato:

- Progressiva [m];
- Portata liquida (T2) [m³/s];
- Portata solida secondo EF [m³/s];
- Portata solida secondo EH [m³/s];
- Portata solida secondo SJ [m³/s].

Tab. 15 Valori di portata liquida T2 e conseguente portata solida secondo le 3 formulazioni di calcolo per il tratto del fiume Bormida

Progressiva [m]	Q _{liquida} T2 [m ³ /s]	Q _{solida} [m ³ /s]		
		EF	EH	SJ
125969	490	1.36	1.96	1.01
126234	490	0.28	0.41	0.32
126241	490	0.21	0.3	0.04
126246	490	1.06	2.16	0
126251	490	0.22	0.31	0
126398	490	0.43	0.5	0.15
127211	490	0.09	0.14	0.06
127691	490	0.77	1.57	0
127987	490	1.12	1.16	0
128014	490	0.34	0.44	0.07
128017	490	1.66	3.54	0
128020	490	0.35	0.46	0.23
128215	490	0.46	0.59	0.26
129216	490	0.07	0.12	0.06
129682	490	0.08	0.14	0.01
130495	490	0.07	0.12	0.01
131210	518	0.25	0.36	0
132087	547	0.13	0.18	0.07
132093	558	0.44	0.55	0.49
132418	590	0.97	2.45	0.47
133095	636	1.08	1.64	0.48
133829	695	0.73	2.79	0.36
134918	730	0.14	0.24	0.07
135957	730	0.56	0.71	0.11
136297	730	0.06	0.12	0.03
136870	730	0.1	0.19	0.05
137375	730	0.1	0.19	0.05
137383	730	0.1	0.18	0.04
137388	730	0.3	0.43	0

Progressiva [m]	Q _{liquida} T2 [m³/s]	Q _{solida} [m³/s]		
		EF	EH	SJ
137392	730	0.1	0.18	0.07
137725	730	0.56	0.82	0.15
138082	730	0.11	0.2	0.01
139926	730	0.52	0.68	0.06
143280	910	0.3	0.46	0.11
144880	914	0.79	1.32	0.12
146001	922	1.07	1.34	0.09
146994	930	0.15	0.28	0.09
148403	936	0.17	0.31	0
148658	937	2.37	3.69	0
148661	937	3.04	15.85	24.8
148682	937	0.06	0.11	1.26
148687	937	0.19	0.31	0
148692	937	0.07	0.13	0.05
148704	940	0.07	0.13	0.01
149338	946	0.58	0.87	0.1
150639	955	0.3	0.5	0.11
151785	965	0.4	0.69	0.11
153368	975	0.17	0.33	0.07
154649	986	0.13	0.17	0.02
156277	992	0.2	0.35	0.03
156330	992	0.15	0.28	0.3
156335	992	0.38	0.6	0
156340	1001	0.17	0.31	0.11
158894	1010	1.21	1.53	0.25
160402	1010	0.19	0.31	0.1
162595	1010	0.34	0.6	0.13
164869	1100	0.1	0.22	0.05
167674	1100	0.32	0.56	0
168649	1100	0.08	0.17	0.08
168664	1100	0.15	0.29	1.3
168669	1100	0.66	1	0
168674	1100	0.18	0.33	0.06
169318	1100	0.74	1.09	0.14
170147	1100	0.49	0.86	0.14
170623	1100	1.73	3.69	0.37
170651	1100	1.46	3.17	0.8
170922	1100	0.03	0.02	0.02
172423	1100	0.64	1.035	0
173071	1100	1.395	1.87	0
173088	1100	1.45	1.905	0
173096	1100	1.465	2.035	0
173413	1100	0.59	1.005	0
173434	1100	0.635	1.055	0

Progressiva [m]	Q _{liquida} T2 [m³/s]	Q _{solida} [m³/s]		
		EF	EH	SJ
173444	1100	0.765	1.17	0
173455	1100	0.795	1.18	0.245
175849	1240	0.09	0.16	0.05
177251	1240	1.98	2.23	0
177334	1240	0.27	0.465	0
177343	1240	0.91	1.29	0
177352	1240	0.28	0.48	0.26
178399	1240	0.08	0.16	0.09
179218	1240	0.53	0.92	0.11
179857	1240	0.06	0.11	0
179960	1240	0.12	0.22	0
179968	1240	0.74	1.06	0
179976	1240	0.12	0.22	0
180048	1240	0.14	0.27	0
180051	1240	0.31	0.53	0
180054	1240	0.14	0.27	4.32
180057	1240	0.04	0.05	0.08
180762	1240	0.37	0.64	0.14
181415	1240	0.16	0.33	0.02
182077	1240	0.3	0.55	0.04
183231	1240	0.16	0.3	0.04
183244	1240	0.41	0.65	0
183256	1240	0.16	0.31	0.05
184139	1240	0.05	0.02	0.01

Tab. 16 Valori di portata liquida T2 e conseguente portata solida secondo le 3 formulazioni di calcolo per il tratto del torrente Orba

Progressiva [m]	Q _{liquida} T2 [m³/s]	Q _{solida} [m³/s]		
		EF	EH	SJ
46026	700	2.3	2.1	0.18
46611	700	1.78	4.56	0.47
46851	700	1.34	1.36	0.59
46944	700	0.69	0.92	0.6
46952	700	1.42	1.47	0.05
46966	700	1.68	2.22	0
46979	700	1.47	1.7	0.75
47054	700	0.62	0.89	0.23
47564	700	2.56	3.13	0.71
48244	700	1.14	1.23	0.4
48629	700	1.51	5.41	0.48
48723	700	3.39	4.88	0
48730	700	2.41	2.73	0
48738	700	2.46	2.98	1.14
49213	700	1.71	1.61	0.65

Progressiva [m]	Q _{liquida} T2 [m³/s]	Q _{solida} [m³/s]		
		EF	EH	SJ
49762	700	1.41	1.45	0.58
50334	701	0.5	0.69	0.17
50793	705	1.45	1.75	0.21
51651	710	0.56	0.77	0.32
52369	714	0.14	0.24	0.15
52850	718	0.33	0.55	0.05
53720	721	0.71	0.95	0.14
53971	723	1.54	2.33	0.18
54212	725	1.11	1.4	0.29
54601	726	1.49	3.5	0.63
54713	743	1.16	1.63	0.29
54720	727	1.17	1.74	0.86
54750	728	1.02	2.03	0.43
55148	731	1.18	1.46	0.3
55670	734	0.86	1	0.19
56193	737	0.69	0.95	0.25
56716	740	0.39	0.56	0.22
57118	744	1.54	1.74	0.31
58263	749	0.54	0.8	0.2
58621	750	1.15	1.45	0.25
58673	750	0.76	0.92	0
58687	750	0.87	1.02	0.02
58696	750	1.12	1.84	1.19
58750	750	0.14	0.26	0.12
59232	750	0.31	0.5	0.08
59711	750	0.41	0.64	0.04
60187	810	0.03	0.05	0
60229	810	3.74	8.93	4.14
60311	810	0.31	0.48	0.58
60437	810	0.44	0.67	0.21
60751	810	1.1	1.23	0.56
60781	810	0.39	0.61	1.18
60787	810	0.52	0.78	0
60815	810	0.58	0.88	0
60842	810	0.35	0.56	0
61017	810	1.16	1.32	0.59
61173	810	0.3	0.49	0.13
61578	810	0.24	0.42	0
61605	810	2.16	13.18	5.38
61688	810	1.39	2.72	1.17
61942	810	1.59	2.08	0.56
62109	810	1.3	1.59	0
62373	810	1.45	3.04	0.21
62443	810	1.48	1.87	0.83

Progressiva [m]	Q _{liquida} T2 [m³/s]	Q _{solida} [m³/s]		
		EF	EH	SJ
62675	810	1.42	1.61	0.38
62839	810	0.71	0.91	0
62945	810	0.73	0.97	0.11
63441	810	1.1	1.25	0.22
63951	810	0.64	0.95	0.27
64252	810	0.93	1.13	0.46
64473	810	0.32	0.51	0.15
64705	810	0.1	0.19	0
64994	810	1.06	7.78	0.47
65486	810	0.52	0.79	0.24
65993	810	1.27	1.67	0.36
66380	810	1.61	3.15	0.55
67322	810	0.55	0.79	0.18
68104	810	1.1	1.23	0.25
68871	810	1.56	1.59	0.5
69251	810	1.37	1.63	0.23
69584	810	1.89	2.54	0
70099	810	1.48	2.62	0
70180	810	2.29	6.19	0.46
70185	810	10.64	51.76	0
70190	810	2.51	9.54	4.12
70279	810	0.48	0.7	0.46
71106	810	0.4	0.61	0.3
71305	810	0.17	0.31	0.09
71658	810	1.07	1.32	0.1
72433	810	0.84	1.05	0.02
72944	810	1.03	1.26	0.07
73612	810	1.36	1.47	0.21
73890	810	0.99	1.18	0.33
74415	810	1.68	3.7	0.61
74725	810	0.59	0.83	0.28
75037	830	2.03	3.11	0.7
75689	830	1.19	2.01	0.46

Tab. 17 Valori di portata liquida T2 e conseguente portata solida secondo la formulazione di Smart-Jaeggi per il tratto di monte del torrente Orba

Progressiva [m]	Q _{liquida} T2 [m³/s]	Q _{solida} [m³/s]
		SJ
32978	510	0.94
34000	510	1.01
35118	510	0.43
35691	510	1.09
36392	510	1.32

Progressiva [m]	Q _{liquida} T2 [m ³ /s]	Q _{solida} [m ³ /s]
		SJ
36599	510	0.41
36912	510	0.50
38504	510	0.42
39617	510	0.43
40561	540	0.66
41095	540	0.55
41779	540	0.40
42274	540	0.53
42471	540	0.63
42752	540	0.39
42915	540	0.48
43260	540	0.33
43260	650	0.34
43968	650	0.32
44657	650	0.35
44986	650	0.46
45552	650	0.31
45983	650	0.29

Tab. 18 Valori di portata liquida T2 e conseguente portata solida secondo la formulazione di Smart-Jaeggli per il tratto della Stura di Ovada

Progressiva [m]	Q _{liquida} T2 [m ³ /s]	Q _{solida} [m ³ /s]
		SJ
1	110	0.15
658	110	0.25
1653	110	0.17
2228	110	0.22
2635	110	0.17
3403	110	0.12
3882	110	0.01
4229	110	0.01