



DICCA
Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e
Ambientale

“Studio morfodinamico del tratto terminale del fiume
Roia”
INTERREG ALCOTRA “Concert-Eaux”
(Programma europeo di cooperazione transfrontaliera tra Francia
e Italia)
WP 4.1e: Studi di morfodinamica fluviale e trasporto solido

Rapporto finale
(Agosto 2020)

Relatori:

Prof. Ing. Michele Bolla Pittaluga

Prof. Ing. Marco Colombini

Indice

1	Acquisizione rilievi topografici e sedimentologici	4
1.1	Raccolta dei dati plano-altimetrici disponibili	5
1.2	Rilievi sedimentologici	5
2	Analisi dell'evoluzione storica del profilo altimetrico del fondo alveo	8
3	Identificazione della portata morfologica e della tendenza evolutiva dell'alveo	13
3.1	Identificazione degli scenari idrologici e sedimentologici	14
3.2	Fondo fisso: i profili di rigurgito	16
3.3	Fondo mobile: le soluzioni di equilibrio	17
3.4	Fiume Roia: analisi dell'equilibrio morfodinamico	19
3.4.1	La portata morfologica	19
3.4.2	La tendenza evolutiva	20
3.4.3	Il confronto con i rilievi storici	24
3.4.4	Stima portata solida in ingresso	24
3.4.5	Stima del tempo scala per il ripristino del fondo di equilibrio	29
4	Conclusioni	31
A	Appendice: Ubicazione planimetrica delle sezioni sezioni PdB e 2019	33
B	Appendice: confronto sezioni PdB e 2019	40

Premessa

Il presente documento costituisce il report tecnico illustrativo delle attività svolte dal gruppo idraulico dell'Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale dell'Università di Genova, nell'ambito del Progetto INTERREG ALCOTRA "Concert-Eaux" per quanto concerne lo sviluppo e l'implementazione di un modello morfodinamico per la stima della configurazione di equilibrio del tratto terminale del fiume Roia.

L'esecuzione dello studio morfodinamico del fiume Roia è propedeutico alla stesura di un programma di gestione dei sedimenti, in accordo con la vigente normativa nazionale in materia. Il programma di gestione dei sedimenti a livello di bacino idrografico è uno strumento conoscitivo, gestionale e di programmazione di interventi relativo all'assetto morfologico dei corridoi fluviali ed ha l'obiettivo di migliorare lo stato morfologico ed ecologico dei corsi d'acqua e di ridurre il rischio di alluvioni tramite interventi sul trasporto solido, sull'assetto plano-altimetrico degli alvei e dei corridoi fluviali nonché sull'assetto e sulle modalità di gestione delle opere idrauliche e di altre infrastrutture presenti sia nel corridoio fluviale sia sui versanti in grado di interagire con le dinamiche morfologiche del reticolo idrografico. Il programma di gestione dei sedimenti deve prevedere, tra l'altro, la definizione di un quadro conoscitivo a scala spaziale e temporale adeguata, in relazione allo stato morfologico attuale dei corsi d'acqua, alla traiettoria evolutiva degli alvei, alle dinamiche e quantità di trasporto solido in atto, all'interferenza delle opere presenti con i processi morfologici.

Lo studio ha avuto dunque come oggetto l'analisi dell'evoluzione morfodinamica del fiume Roia nel recente passato, ed è articolato in tre fasi. La prima fase è relativa all'acquisizione dei rilievi altimetrici e sedimentologici relativi al tratto in esame. Nella seconda fase, sulla base dei rilievi topografici acquisiti, si analizza l'evoluzione altimetrica del fondo alveo nel recente passato. Infine, nella terza fase, sono state determinate le portate morfologiche e la tendenza evolutiva del corso d'acqua ad esse associata.

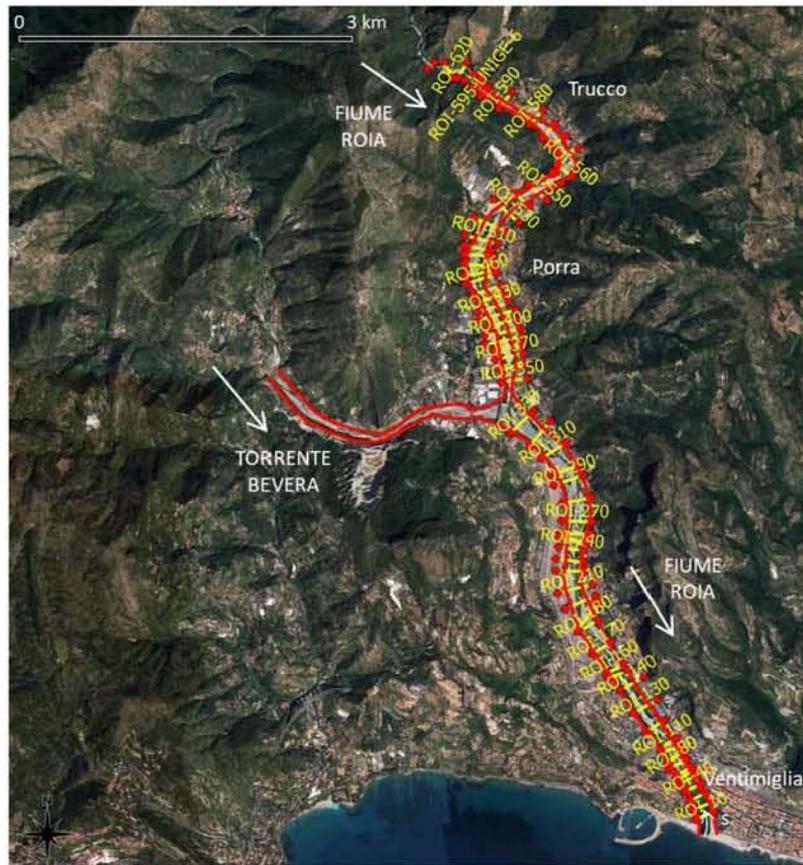


Figura 1: Planimetria del tratto analizzato del fiume Roia.

1 Acquisizione rilievi topografici e sedimentologici

Obiettivo di questa fase è quello di reperire i dati disponibili relativi al tratto terminale del fiume Roia compreso tra la foce e località Trucco, per una lunghezza complessiva di circa 9 km (Figura 1), al fine di trarre informazioni sulla tendenza evolutiva dell'alveo nel recente passato. A tale scopo, sono stati raccolti tutti i dati plano-altimetrici e sedimentologici disponibili relativi al tratto oggetto di studio. Si è fatto riferimento ai più recenti e dettagliati rilievi altimetrici ma anche a tutti quei rilievi topografici associati a interventi di sistemazione, già realizzati o in progetto, che permettessero di risalire all'assetto altimetrico del corso d'acqua negli ultimi decenni. In particolare, sono stati analizzati i risultati del rilievo topografico effettuato nell'ambito del presente progetto da GTER nell'estate 2019, posti a confronto con i rilievi

alla base del Piano di Bacino del 2002.

1.1 Raccolta dei dati plano-altimetrici disponibili

Al momento della stesura del presente rapporto sono state acquisite le seguenti informazioni topografiche:

- Rilievo del 2002, fornito dalla Regione Liguria, alla base del Piano di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI) approvato il 27 febbraio 2003, nel seguito identificato come **Rilievo PdB**. La geometria delle sezioni è stata fornita sia in formato HEC-RAS che dxf, mentre la posizione geografica delle stesse è stata fornita in formato dxf.
- Rilievo del 2019 effettuato dalla società Gter S.r.l nell'ambito del presente progetto nel seguito denominato **Rilievo 2019**. A differenza dei rilievi pregressi, eseguiti presumibilmente mediante tecnica topografica tradizionale o aste graduate, il suddetto rilievo, eseguito nel 2019, è stato svolto principalmente per via aerofotogrammetrica, integrata a terra mediante rilievo GNSS di punti di appoggio a terra (Ground Control Point) necessari per la georeferenziazione del successivo modello 3D derivante. Il rilievo aerofotogrammetrico è stato effettuato in modalità nadirale, ad alta quota e in automatico ed è stato seguito, in caso di opere in alveo, da un rilievo a pilotaggio manuale, a bassa quota e con una camera inclinata di 45° da entrambi i lati di ciascuna opera, per la ricostruzione del modello tridimensionale dell'opera stessa e per definire correttamente le sezioni prossimali. Le sezioni d'interesse per il presente studio sono state estratte dalla nuvola di punti derivante dal rilievo aerofotogrammetrico opportunamente corretto con le misure a terra.
- Aggiornamento del rilievo topografico del 2019 effettuato da DHI, nel seguito denominato **Rilievo DHI 2019**. Una approfondita analisi del rilievo 2019 ha evidenziato una serie di anomalie nelle sezioni che hanno reso necessaria una rivisitazione di esse. Questo aggiornamento è stato dunque utilizzato come base di partenza per il presente studio morfodinamico in quanto si è ritenuto fornisce la miglior rappresentazione dello stato attuale del corso d'acqua.

1.2 Rilievi sedimentologici

Nell'ambito del presente progetto sono stati effettuati con la tecnica del pebble count quattro rilievi sedimentologici nel tratto terminale del fiume Roia

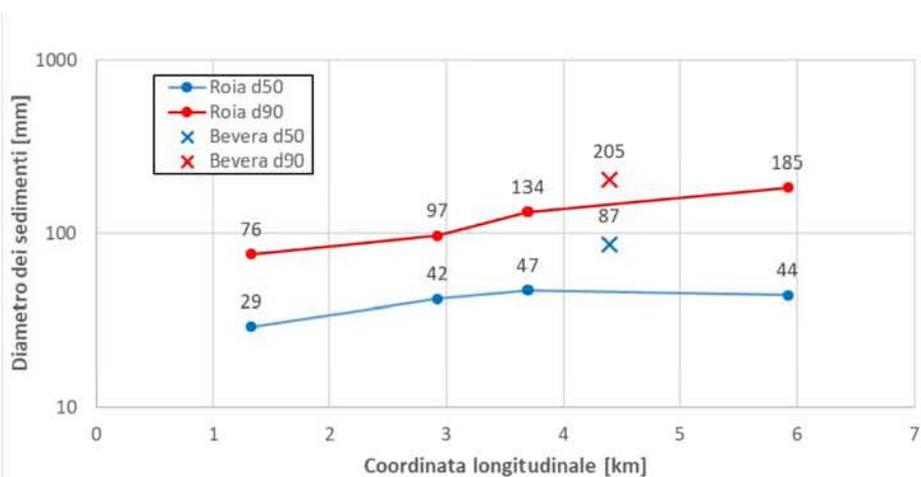
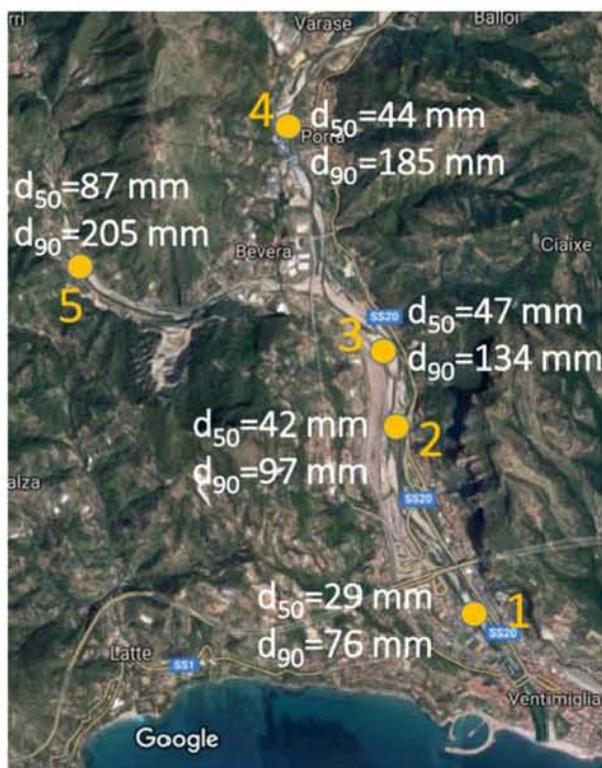


Figura 2: Prelievi sedimentologici effettuati nel tratto in esame.

Prelievo	Corso d'acqua	d_{50} [mm]	d_{90} [mm]
1	Roia	29	76
2	Roia	42	97
3	Roia	47	134
4	Roia	44	185
5	Bevera	87	205

Tabella 1: Risultati dei prelievi granulometrici nelle diverse sezioni sul fiume Roia e sul torrente Bevera.

e un rilievo nel torrente Bevera (vedi Figura 2). I risultati di tali prelievi sono riportati nella Tabella 1 e mostrano come lungo il fiume Roia il diametro mediano dei sedimenti sia caratterizzato da modeste variazioni spaziali, mentre il diametro mediano dell'affluente Bevera risulti superiore rispetto a quello dell'alveo principale. Nelle analisi morfodinamiche relative all'equilibrio dell'asta principale del fiume Roia riportate nel seguito si è dunque assunto un diametro mediano d_{50} pari a 42 mm rappresentativo dell'intero tratto analizzato.

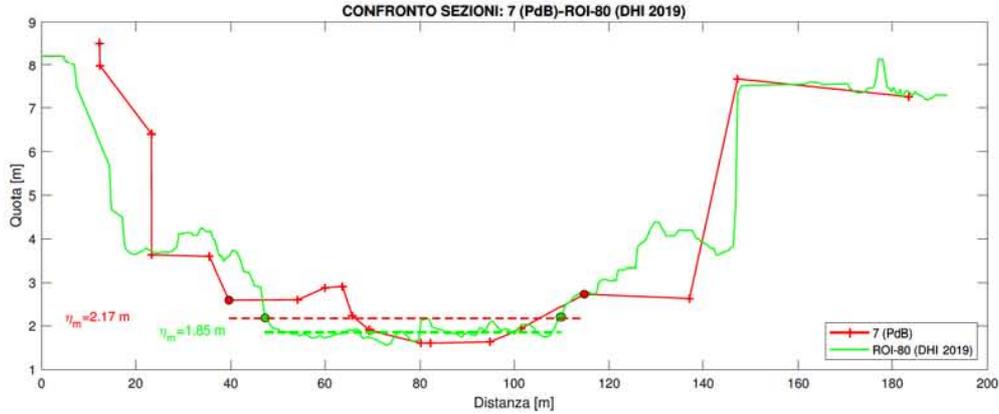


Figura 3: Confronto tra thalweg e fondo medio.

2 Analisi dell'evoluzione storica del profilo altimetrico del fondo alveo

La localizzazione geografica delle sezioni rilevate nelle diverse campagne topografiche è stata effettuata su piattaforma GIS, nel sistema di riferimento UTM zona 32N. Particolare cura è stata dedicata al posizionamento relativo dei diversi rilievi, anche attraverso la verifica di capisaldi di sezione o, più in generale, di punti fissi che permettano di collocare in senso altimetrico i rilievi effettuati in anni diversi, consentendone un corretto confronto.

Si è quindi proceduto alla definizione manuale dell'alveo attivo e della linea d'asse, mediante analisi morfometrica eseguita in Matlab e analisi di immagini satellitari e ortofoto. Questo ha permesso di individuare un'unica coordinata longitudinale di riferimento, sulla base della quale sono stati realizzati i profili altimetrici della linea di thalweg (linea che unisce i punti più bassi di ciascuna sezione), ciascuno associato ad un particolare rilievo e quindi in grado di descrivere l'assetto del fondo nel tratto e nel periodo corrispondenti. L'individuazione dell'alveo attivo ha inoltre consentito di identificare la larghezza dell'alveo su cui è stata effettuata l'operazione di media per la definizione di quota media del fondo η_m .

$$\eta_m = \frac{1}{b_f} \int_0^{b_f} \eta(y) dy \quad (1)$$

dove b_f è la larghezza dell'alveo attivo (che partecipa al trasporto solido) e $\eta(y)$ è la quota del fondo alla coordinata trasversale y .

Rispetto al profilo del thalweg (punto a quota più bassa in una generica sezione) l'assetto altimetrico del fondo medio è meno sensibile a variazioni

del fondo alveo dovute a fenomeni localizzati (profonde incisioni, depositi dovuti a barre etc.). Si osservi a titolo di esempio l'immagine di Figura 3 dove viene riportata la stessa sezione rilevata nel 2002 (Rilevo PdB, in rosso) e nel 2019 (Rilievo DHI 2019, in verde). Si noti il diverso dettaglio del rilievo e la diversa quota del fondo medio (rappresentato dalle linee orizzontali) a parità di quota del thalweg.

A seguire sono riportati i profili altimetrici del thalweg e del fondo medio (figure 4 e 5) mentre in Appendice A sono presentate in successione, procedendo da monte verso valle, le posizioni delle sezioni corrispondenti al rilievo PdB e al rilievo DHI 2019 sovrapposti all'immagine satellitare. Inoltre, in Appendice B sono mostrati i confronti tra le sezioni corrispondenti per i due rilievi analizzati.

Il grafico in Figura 6 mostra l'andamento del volume eroso nel periodo 2002-2019 in funzione della distanza dal mare. In particolare, allontanandosi dal mare il grafico riporta il volume di sedimenti complessivamente eroso nel tratto a valle della sezione considerata. Come può notarsi, il corso d'acqua è stato oggetto di un progressiva erosione, per un volume complessivo nel tratto considerato pari a circa $540000 m^3$. Si noti che nel periodo 2003-2010 il corso d'acqua è stato oggetto di un massiccio intervento di asportazione di sedimenti la cui entità, che non è stato possibile stimare accuratamente ma è dell'ordine di alcune centinaia di migliaia di metri cubi¹, appare comunque compatibile con il dato stimato dall'analisi dei rilievi storici.

Procedendo da monte verso valle i profili del thalweg e del fondo medio conducono alle seguenti osservazioni:

- **Tratto ROI-600 - ROI-570** - Il fondo appare in sostanziale equilibrio, con modeste variazioni nel periodo 2002/2019. Ne fa eccezione una lieve tendenza all'erosione nella sezione ROI-600 e un intenso scavo localizzato dell'ordine dei 5 metri nella sezione ROI-570 che si ritiene opportuno venisse verificato con ulteriore rilievo.
- **Tratto ROI-560 - ROI-540** - Si osserva una lieve tendenza all'erosione in questo tratto sia dall'analisi del fondo medio che da quella sul thalweg.
- **Tratto ROI-530 - ROI-470** - Il tratto risulta in equilibrio, presentando un'alternanza di punti in erosione e in deposito, con una lieve tendenza all'erosione.

¹Programma Alcotra 2007-2013, Progetto n. 192 BIODIVAM - Relazione illustrativa SIC IT 1315720 Fiume Roia

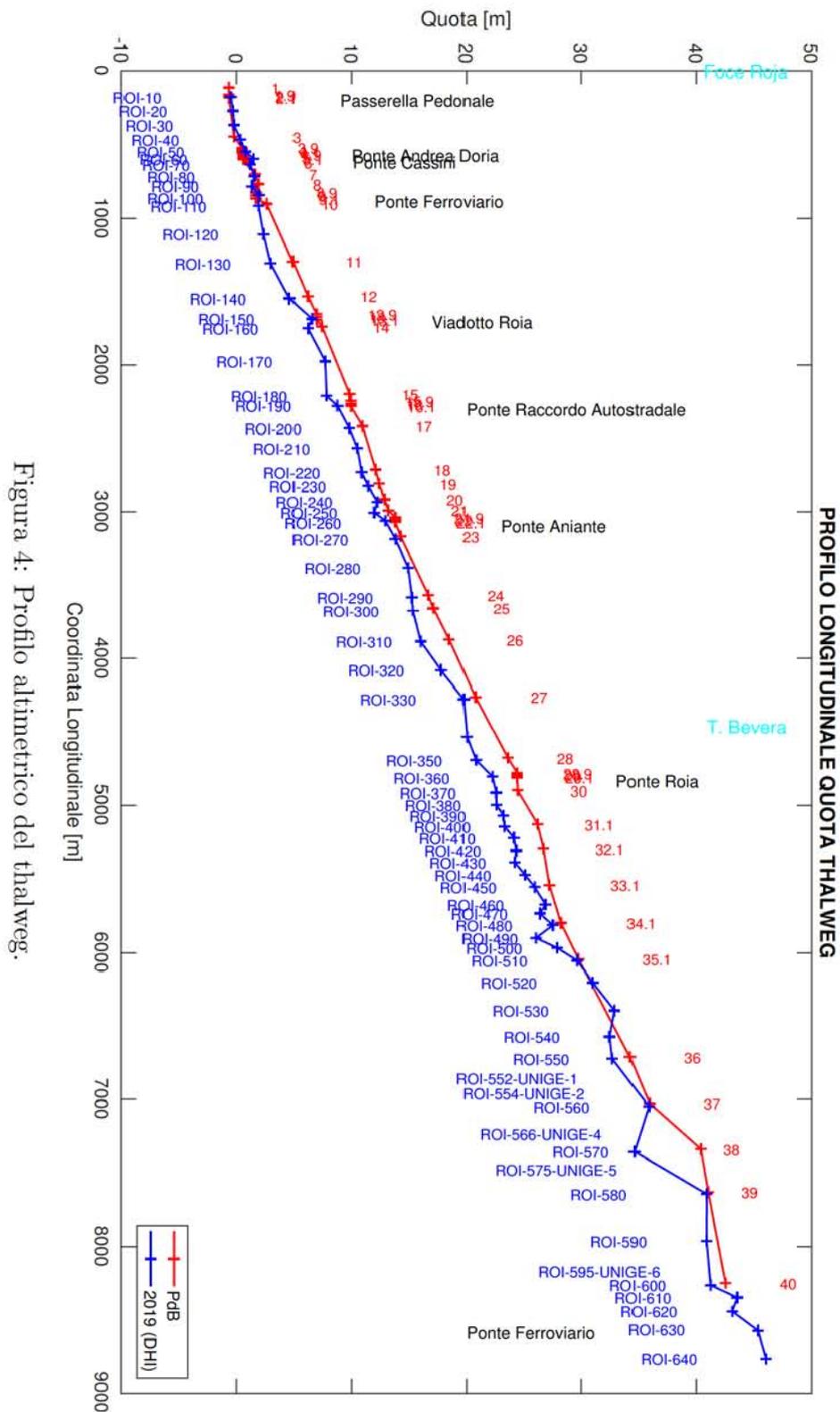


Figura 4: Profilo altimetrico del thalweg.

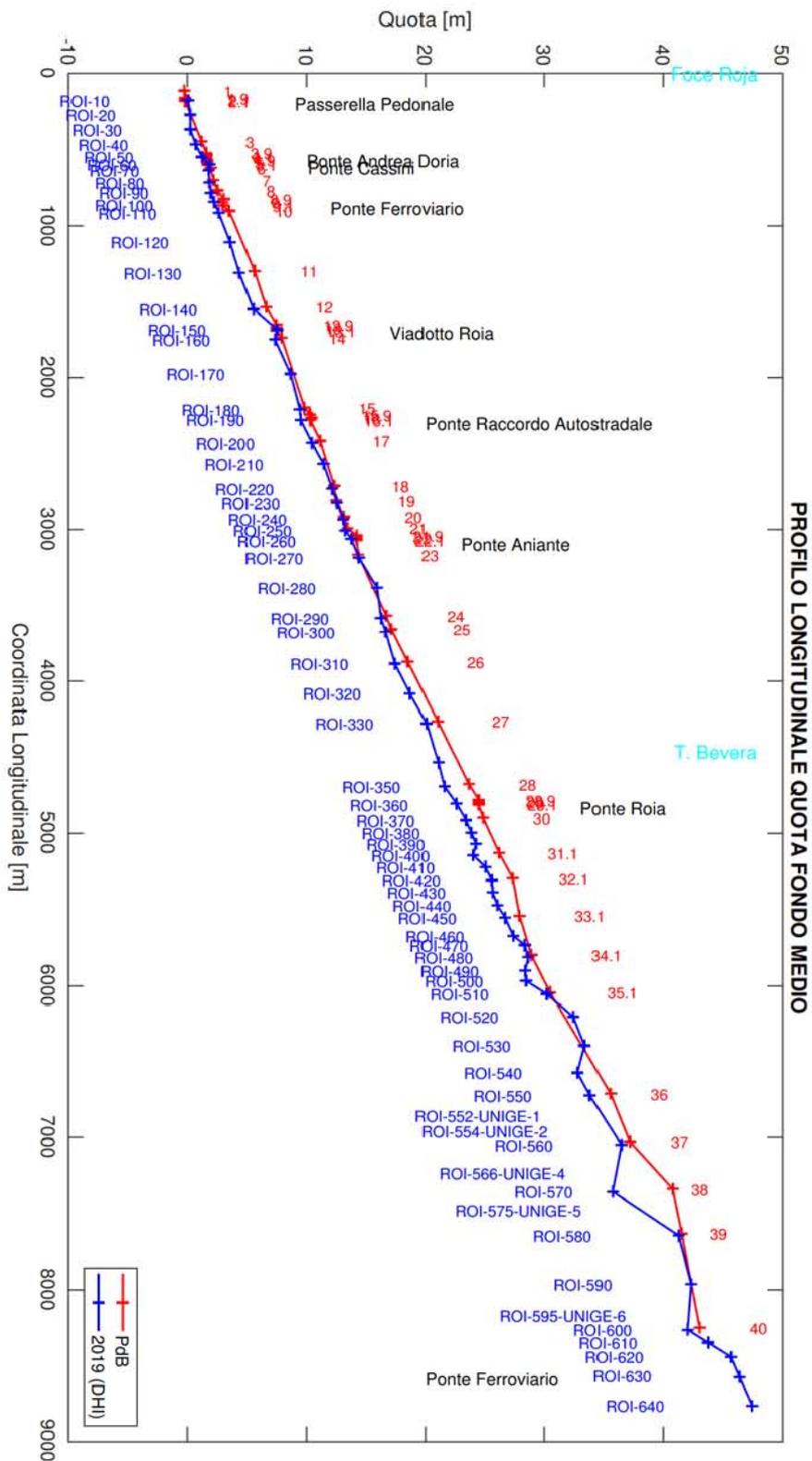


Figura 5: Profilo altimetrico del fondo medio.

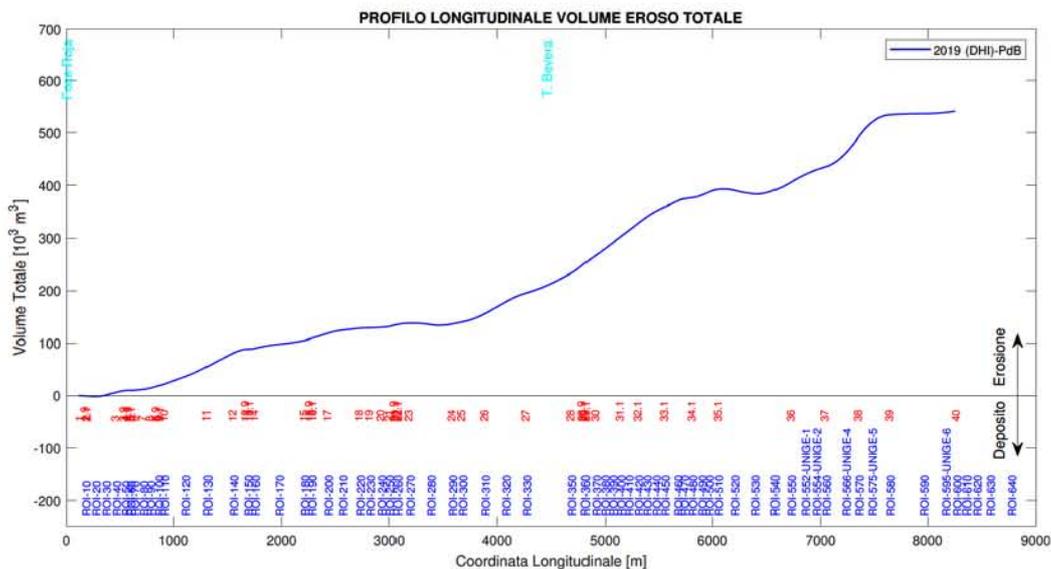


Figura 6: Volume eroso nel periodo 2002-2019 in funzione della distanza dal mare.

- **Tratto ROI-460 - ROI-310** - Questo tratto che si estende per circa 1.3 km a monte della confluenza con il torrente Beveria e per circa 500 m a valle si rileva una significativa erosione sia nel fondo medio (dell'ordine di 1.5 metri) che nel thalweg.
- **Tratto ROI-300 - ROI-150** - Il tratto appare in sostanziale equilibrio, benchè sia presente una lieve erosione sia a monte della soglia localizzata in sezione ROI-190 che a monte della soglia localizzata in sezione ROI-150.
- **Tratto ROI-140 - ROI-10** - Nel tratto terminale del corso d'acqua si osserva una erosione che progressivamente diminuisce procedendo verso la foce dove il fondo appare sostanzialmente stabile.

3 Identificazione della portata morfologica e della tendenza evolutiva dell'alveo

Nel presente paragrafo si descriveranno i risultati relativi allo studio dell'equilibrio morfodinamico sul torrente Roia.

Prima di delineare brevemente le modalità attraverso le quali è possibile studiare l'equilibrio morfodinamico in un corso d'acqua, appare opportuno svolgere alcune considerazioni a proposito dell'estensione del tratto che deve essere modellato.

La soluzione del problema del moto (idrodinamico, ma anche morfodinamico) richiede infatti, nelle sezioni iniziale e finale del tratto di alveo considerato, l'imposizione di opportune condizioni al contorno che, a loro volta, richiederebbero la conoscenza di un legame locale tra variabili cinematiche e geometriche e quindi di una scala di deflusso. A tale problema non può essere data, quindi, una risposta generale: la sensibilità del modellista gioca in questo caso un ruolo fondamentale.

Possono comunque essere fornite alcune regole generali a cui ispirarsi:

1. se esistono tratti, a monte o a valle, in cui l'alveo è ben approssimabile come cilindrico (in cui cioè le variazioni longitudinali di larghezza - o, più generalmente, di sezione liquida - siano trascurabili) e la loro estensione è tale da poter ipotizzare il raggiungimento di condizioni di moto uniforme, è lecito sostituire tali tratti con sezioni di estremità in cui imporre localmente una scala di deflusso di moto uniforme (nel caso di fondo mobile, ciò determina in maniera univoca anche la portata solida che attraversa quella sezione);
2. quando possibile, è utile far coincidere la sezione di sbocco con il mare, poiché in tale sezione il livello è, ovviamente, assegnato (eventualmente maggiorato per considerare effetti associati al moto ondososo);
3. se sono presenti sezioni di controllo, sezioni cioè in cui la presenza di opere consente di identificare a priori le caratteristiche del moto (si pensi, ad esempio, ad una briglia non rigurgitata o ad un ponte in condizioni di transizione o, nel caso morfodinamico, ad una sezione in cui il fondo sia artificialmente o naturalmente inerodibile) queste possono essere efficacemente utilizzate come sezioni di estremità;
4. il tratto considerato non deve contenere affluenti importanti e deve comunque essere sufficientemente breve da assicurare che eventuali portate scolanti direttamente in alveo siano una frazione trascurabile della portata in ingresso;

Identificate con questi criteri le sezioni di estremità è necessario infine verificare che le precedenti condizioni sussistano per tutto l'intervallo di portate che si desidera studiare. A tale proposito si noti che il limite superiore è quello associato ad incipiente esondazione nel tratto considerato. Il limite inferiore va ricercato in termini di portata di attivazione, cioè la minima portata per la quale in ogni sezione del tratto considerato la tensione al fondo eccede la tensione critica. Per quanto riguarda la condizione al contorno di valle, si è imposta una quota della superficie libera nella sezione di valle (roi-10) pari a 1.0 m s.l.m. per tener conto del fatto che la sezione è posta ad una distanza dalla linea di riva di circa 200 m a cui corrisponde, per il valore di pendenza media di $5 \cdot 10^{-3}$, un dislivello di un metro.

L'estensione del tratto considerato nel presente studio (circa 9 Km) ha richiesto di superare alcune delle condizioni sopra esposte, in particolare quelle relative alla costanza della portata liquida. Nel tratto del fiume Roia in esame insiste infatti l'affluente Bevera, il cui contributo in termini di portata è certamente non irrilevante. Si è quindi deciso di considerare la portata liquida come costante nel tratto a monte e a valle dell'affluente, concentrando nella sezione posta in corrispondenza del torrente Bevera il contributo dell'affluente stesso e della portata scolante nel tratto a valle di questo.

Per la stima del contributo associato al torrente Bevera si è proceduto identificando scenari idrologici a tempo di ritorno costante, secondo la procedura definita nella sezione seguente.

3.1 Identificazione degli scenari idrologici e sedimentologici

Consideriamo anzitutto la percentuale di area del sottobacino del torrente Bevera rispetto all'area complessiva del bacino del Roia chiuso alla sezione posta a valle dell'affluente stesso. Tale percentuale definisce in modo immediato la 'potenza' dell'affluente, poiché un valore pari, ad esempio, al 50% indica che il sottobacino ha la stessa estensione del bacino dell'asta principale chiuso a monte della confluenza e quindi, considerando la portata come proporzionale all'area dei bacini attraverso lo stesso coefficiente unitario, i due rami partecipano in modo paritario a definire la portata a valle della confluenza.

L'analisi mostra che il torrente Bevera fornisce un contributo areale pari al 23%. Nel definire gli scenari idrologici necessari per svolgere le analisi di equilibrio morfodinamico, si è dunque scelto di considerare il contributo del torrente Bevera concentrando in corrispondenza dell'affluente anche il

Località	Area [Km ²]	Q_2 [m ³ /s]	Q_5 [m ³ /s]	Q_{10} [m ³ /s]	Q_{20} [m ³ /s]	Q_{50} [m ³ /s]	Q_{100} [m ³ /s]	Q_{200} [m ³ /s]	Q_{500} [m ³ /s]
Q Roia Foce	671	334	586	791	1017	1355	1645	1974	2247
Q Roia 1	661	332	582	787	1012	1352	1645	1973	2247
Q Roia 0	503	251	443	606	787	1062	1295	1556	1935
Q Roia Airole	481	246	440	602	784	1058	1292	1553	1931
Q Bevera 0	159	81	144	197	256	344	419	502	624

Tabella 2: Portate con tempo di ritorno 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 e 500 anni per diverse sezioni sul fiume Roia.

contributo associato alla portata scolante dai versanti per tutto il tratto posto a valle della confluenza, fino allo sbocco a mare.

Si pone dunque il problema di identificare, per ogni valore assegnato della portata in ingresso nel tratto considerato, il contributo da associare all'affluente. A questo scopo, in stretta analogia con le metodologie correntemente utilizzate per le verifiche idrauliche, si è scelto di costruire scenari idrologici individuando il contributo dell'affluente come quello associato ad un ipotetico evento con assegnato tempo di ritorno sull'asta principale.

In tabella 2 sono riportati i valori delle portate con tempo di ritorno 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 e 500 anni per il bacino del fiume Roia chiuso a diverse sezioni nel tratto considerato, così come indicati nello studio idrologico sviluppato dal DICCA nell'ambito del presente progetto "Concert-Eaux". Al fine di estendere i precedenti scenari per un generico tempo di ritorno T si sono interpolate le differenze tra i valori di portata caratterizzati da tempi di ritorno pari a 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 e 500 anni tra il tratto a monte e a valle dell'affluente individuando i coefficienti di un polinomio del 5° ordine che meglio approssimano tali valori. I valori dei coefficienti così determinati consentono di individuare il contributo dell'affluente corrispondente allo scenario idrologico analizzato e, di conseguenza, di individuare le portate defluenti in ciascun tratto per un assegnato tempo di ritorno.

Una volta individuato, secondo la procedura appena descritta, il contributo dell'affluente in termini di portata liquida, si pone il problema di quantificare un eventuale contributo in termini di portata solida da parte dell'affluente stesso. Ai fini della determinazione delle portate morfologiche, infatti, ogni tratto viene sollecitato con una coppia di valori di portata liquida e solida, ricercando quella particolare combinazione che minimizza lo scostamento del fondo simulato da quello rilevato.

Il problema non può però risolversi in maniera analoga a quanto fatto con la fase liquida, perché l'affluente non può essere considerato in equilibrio

morfologico rispetto ad una portata liquida che viene definita per differenza sull'alveo principale. Si è dunque deciso di procedere identificando due situazioni limite:

1. si assume che la portata solida si mantenga costante: ciò corrisponde ad assumere che l'affluente fornisca un contributo nullo di portata solida, rendendo disponibile la sola portata liquida e inducendo una diminuzione della pendenza media del tratto posto a valle dell'affluente rispetto a quello di monte;
2. si assume che la portata solida aumenti in proporzione alla portata liquida: ciò corrisponde ad assumere che l'affluente renda disponibile esattamente la quantità di sedimenti che il surplus di portata liquida è in grado di trasportare all'interno dell'alveo principale, mantenendo di fatto la stessa pendenza media del fondo nei due tratti posti a monte e a valle dell'affluente.

Nella realtà, c'è da attendersi che il contributo dell'affluente in termini di portata solida sia compreso tra questi due estremi. Le simulazioni effettuate hanno mostrato come la seconda soluzione tenda a sovrastimare la portata solida procedendo verso valle, conducendo ad un peggior accordo dell'assetto del fondo con quello rilevato rispetto all'ipotesi di costanza della portata solida. Nel presente studio si è quindi utilizzata la prima ipotesi, anche in considerazione del fatto che il diametro dei sedimenti rilevato nell'alveo del torrente Bevera è superiore rispetto a quello dell'asta principale. Si può dunque ragionevolmente assumere che il contributo di portata solida proveniente dall'affluente nella classe granulometrica mediana dell'alveo principale sia trascurabile.

3.2 Fondo fisso: i profili di rigurgito

La determinazione dei profili di rigurgito, cioè l'identificazione, per un'assegnata portata stazionaria, della quota della superficie libera in ogni sezione appartenente al tratto del corso d'acqua che si intende modellare, rappresenta uno dei classici problemi dell'Idraulica Fluviale.

Imponendo la stazionarietà del moto (assumendo cioè che la soluzione sia indipendente dal tempo), il problema definito dalle equazioni del moto e di continuità nell'ambito dello schema di corrente monodimensionale si semplifica come segue:

1. la conservazione della massa si traduce nella conservazione della portata liquida Q in tutto il tratto considerato;

2. il principio della quantità di moto si traduce nell'equazione:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -j \quad j = \frac{Q^2}{K_s^2 \Omega^2 R^{4/3}} \quad (2)$$

dove H è il carico totale valutato nella generica sezione di calcolo, j la perdita di carico totale per unità di lunghezza, K_s è il coefficiente di Gauckler-Strickler e R il raggio idraulico (rapporto area/contorno bagnato).

Nelle valutazioni stazionarie a fondo fisso, la (2) viene solitamente rielaborata, conducendo all'equazione dei profili di rigurgito:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = i_f - j \quad E = \left(Y + \frac{U^2}{2g} \right) \quad (3)$$

dove E rappresenta il carico specifico, i_f la pendenza del fondo, Y la profondità della corrente, U la sua velocità media e g l'accelerazione di gravità.

L'integrazione della (3) a partire da un'opportuna condizione al contorno consente infatti di determinare, in ciascuna sezione del tratto considerato e per un valore assegnato della portata Q in ingresso, il valore della profondità e di tutte le grandezze geometriche ad essa correlate e, in particolare, della quota della superficie libera (che corrisponde al carico piezometrico h) rispetto ad un generico riferimento orizzontale, identificando così il cosiddetto *profilo di rigurgito* della corrente.

3.3 Fondo mobile: le soluzioni di equilibrio

Semplici considerazioni sull'equazione di Exner mostrano che una soluzione stazionaria del problema a fondo mobile può ottenersi solo se la portata solida è costante in tutto il tratto e pari, quindi, alla portata solida in ingresso. Questa condizione è automaticamente verificata in moto uniforme ma non è in generale soddisfatta se sono presenti disuniformità del moto associate a variazioni della geometria dell'alveo nel tratto considerato.

Tuttavia, per ogni valore della portata liquida (e solida) assegnato nella sezione di monte, esiste, in ogni sezione del tratto considerato, un unico valore di profondità che soddisfa la costanza della portata solida. A tale profondità, vista la costanza della portata liquida, corrisponde un unico valore del carico cinetico. *In condizioni di equilibrio morfodinamico* sono cioè univocamente definite le caratteristiche geometriche e cinematiche della corrente e, in particolare, il carico specifico E e la perdita di carico totale per unità di lunghezza j .

L'assetto del fondo è, a questo punto, determinato dall'integrazione della (2) a partire da un valore del carico totale H assegnato nella sezione di

valle. Noto il carico totale in ogni sezione, infatti, la quota del fondo è immediatamente ottenibile essendo $\eta = H - E$.

Va ricordato che, assumendo condizioni di moto uniforme e scegliendo un'opportuna formula di trasporto, ad ogni valore di portata liquida corrisponde una capacità di trasporto della corrente e quindi è possibile determinare la corrispondente portata solida.

In particolare, definito il parametro di Shields:

$$\theta = \frac{RS}{(s-1)d_{50}} \quad (4)$$

dove S è la pendenza del fondo e s è la densità relativa dei sedimenti (2.65 per sabbia), la portata solida vale:

$$Q_s = b_f \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \Phi(\theta) \quad \Phi(\theta) = 3.97(\theta - 0.0495)^{3/2} \quad (5)$$

dove b_f è la larghezza dell'alveo attivo a superficie libera e la portata solida adimensionale $\Phi(\theta)$ è stimata attraverso la formula di Wong & Parker (2006).

La semplice procedura sopra descritta permette quindi di determinare gli assetti di equilibrio del fondo e della superficie libera note le caratteristiche geometriche e sedimentologiche dell'alveo, le portate liquida e solida in ingresso e il valore del carico totale (o piezometrico) nella sezione di valle.

In particolare, nel seguito verranno presentate le soluzioni di equilibrio ottenute assegnando diverse coppie di valori di portata liquida e solida in ingresso. Obiettivo di queste valutazioni è di determinare la cosiddetta 'portata morfologica', cioè la portata liquida (e la corrispondente portata solida) che genera il minimo scostamento rispetto al profilo rilevato.

Il concetto di portata morfologica assume una notevole importanza nello studio dell'equilibrio morfodinamico, perché individua la coppia di valori di portata liquida e solida che meglio approssima il fondo rilevato. Qualora lo scarto medio risultasse pari a zero, la portata morfologica identificherebbe in modo univoco le portate 'formative' per l'assetto rilevato.

La ricerca dei valori di portata liquida e solida che minimizzano lo scarto quadratico medio permette non solo di identificare la portata morfologica ma, soprattutto, di svolgere alcune considerazioni sulla tendenza all'erosione o al deposito nei diversi tratti del corso d'acqua in esame in termini dello scostamento tra la soluzione di equilibrio associata a tale coppia di portate e il fondo rilevato.

Va sottolineato, che non necessariamente il fondo rilevato sarà in equilibrio in tutti i tratti, per cui il concetto di portata morfologica potrebbe perdere di significato. In questi casi, la presenza di rilievi storici assume una grande importanza perché consente di guidare la ricerca del minimo, ad

esempio restringendo il calcolo dello scarto quadratico medio ai soli tratti in cui i rilievi suggeriscono un sostanziale equilibrio nel corso degli anni.

3.4 Fiume Roia: analisi dell'equilibrio morfodinamico

Nel presente paragrafo verranno presentate le valutazioni relative all'equilibrio morfodinamico del fiume Roia. Seguendo la procedura descritta nella sezione 3.3, sono state generate soluzioni di equilibrio corrispondenti a diversi valori di portata liquida e solida in ingresso. Per ciascuna simulazione si è poi determinato il valore dello scarto quadratico medio della soluzione di equilibrio rispetto al profilo rilevato. Il confronto tra i rilievi storici presentato nella sezione 2 ha mostrato come vi siano dei tratti lungo il corso d'acqua in cui si è verificato uno scostamento tra i fondi rilevati nei diversi anni. Per la ricerca della portata morfologica si è dunque ristretto il calcolo dello scarto quadratico ai soli tratti in cui i rilievi suggerivano un sostanziale equilibrio nel corso degli anni, e in particolare:

- Il tratto a monte della confluenza con il torrente Bevera, in corrispondenza di località Porra, compreso tra la sezione roi-530 e la sezione roi-510 per una lunghezza di circa 350 m.
- Il tratto a valle della confluenza con il torrente Bevera nei pressi del Ponte Aniante (sezione roi-260), compreso tra la sezione roi-280 e la sezione roi-210 (posta circa 300 m a monte del Ponte Raccordo Autostradale) per una lunghezza di circa 800 m.
- Il tratto terminale compreso tra la sezione roi-80 e la sezione roi-60 (Ponte Cassini) per una lunghezza di circa 100 m.

In particolare, ai fini della determinazione della portata morfologica tutto il tratto compreso tra la sezione roi-640 e la sezione più prossima alla foce (roi-10) è stato trattato senza disconnettere il dominio di calcolo in corrispondenza della confluenza ma includendo il contributo dell'affluente Bevera.

3.4.1 La portata morfologica

In Figura 7 sono riportati i valori dello scarto quadratico medio in funzione della portata liquida e per diversi valori della portata liquida per il tratto considerato. Ad ogni curva colorata corrisponde un diverso valore di portata solida ed è interessante osservare come tutte le curve presentino un minimo. Per ogni valore di portata solida esiste dunque sempre un valore di portata

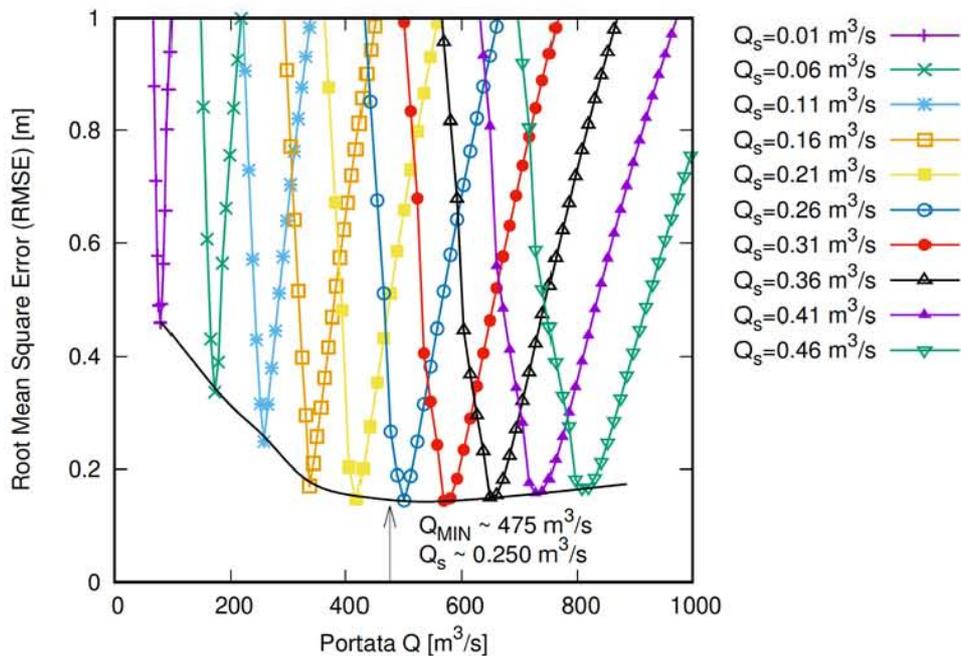


Figura 7: Curve dello scarto tra fondo simulato e rilevato al variare delle portate liquida e solida.

liquida per cui è minimo lo scarto tra la soluzione di equilibrio e il profilo rilevato.

Inoltre, la curva che involupa i minimi, indicata in nero nel grafico, ha un minimo essa stessa (evidenziato dalla freccia in figura) che identifica la portata liquida (e la corrispondente portata solida) morfologica. Per il fiume Roia, i valori delle portate morfologiche (liquida e solida) alla foce sono risultati pari, rispettivamente, a $475 \text{ m}^3/\text{s}$ e a $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$. Secondo lo studio idrologico del DICCA, a tale valore di portata liquida è associabile un tempo di ritorno di circa 3 anni, in buon accordo con quanto indicato dalla letteratura scientifica in argomento, che individua in $\sim 1.5 - 3$ anni il tempo di ritorno caratteristico della portata morfologica.

3.4.2 La tendenza evolutiva

Una volta determinata la portata morfologica, come quella che meglio approssima l'assetto del fondo rilevato nei tratti in cui il corso d'acqua è risultato stabile, è utile esaminare il profilo del fondo medio ad essa associato. Nelle figure 8-9 sono riportati i profili associati alle portate morfologiche determinate nella sezione precedente (η), i profili del fondo medio rilevati nel 2019

e i profili della superficie libera (h), del carico critico (h_c) e del carico totale (H) per ciascuno dei tratti considerati.

Per quanto riguarda il tratto a valle della confluenza con il torrente Bevera (Figura 8), procedendo da valle verso monte il profilo mostra un sostanziale equilibrio nel tratto terminale compreso tra la sezione roi-120 e la foce. Ne fa eccezione il tratto focivo (sezioni roi-20 e roi-10) dove si osserva una tendenza all'erosione.

Una tendenza al deposito è osservabile a valle della soglia posta in corrispondenza del Viadotto Roia (sezione roi-150) per un tratto di circa 500 m fino alla sezione roi-120. Il tratto compreso tra la soglia del Viadotto Roia (sezione roi-150) e la soglia del Ponte Raccordo Autostradale (sezione roi-190) risulta in sostanziale equilibrio, vista anche la presenza delle soglie inerodibili poste a protezione dei ponti che individuano punti fissi del profilo d'alveo, come evidenziato da un brusco innalzamento del fondo inerodibile mostrato in colore grigio nelle figure 8-9. Si noti che, a fini puramente computazionali, la quota del fondo inerodibile è stata posizionata convenzionalmente in tutto l'alveo a 10 m sotto il livello del fondo rilevato al 2019 e fatta poi coincidere con il fondo rilevato sia nelle sezioni in cui sono presenti opere (due nel tratto considerato) sia nella sezione roi-int-unige-6 posta nel tratto a monte di località Trucco dove il sopralluogo ha evidenziato un affioramento del fondo roccioso. Può essere utile ricordare in corrispondenza di sezioni inerodibili, la corrente può solo depositare sedimenti sul fondo roccioso e non, ovviamente, eroderlo.

Un sostanziale equilibrio si osserva inoltre anche nel tratto a monte della soglia del Ponte Raccordo Autostradale (sezione roi-190) fino alla sezione roi-280, con l'unica eccezione di un breve tratto in corrispondenza del Ponte Aniante (sezione roi-260) dove si riscontra una lieve tendenza al deposito.

Una marcata tendenza al deposito caratterizza il tratto del fiume Roia in corrispondenza della confluenza con il torrente Bevera compreso a valle dalla sezione roi-290 e a monte dalla sezione roi-510 (Figura 9) per una lunghezza complessiva di circa 2.5 km e una erosione media di circa 1.5 m.

Nel tratto compreso tra la sezione roi-510 e la sezione roi-int-unige-4 si osserva nuovamente un sostanziale equilibrio con l'unica eccezione delle sezioni roi-540 e roi-550 dove si riscontra nuovamente una significativa tendenza al deposito, dell'ordine del metro.

I risultati del modello nel tratto a monte della sezione roi-560 mostrano complessivamente una tendenza all'erosione. Tuttavia, le valutazioni di equilibrio in tale tratto sono da considerarsi meno attendibili. L'affioramento dello strato roccioso nella sezione roi-int-unige-6, considerata inerodibile, suggerisce infatti che nel tratto possa realizzarsi una limitata disponibilità di sedimenti, violando così una delle ipotesi su cui è basato il modello. Inol-

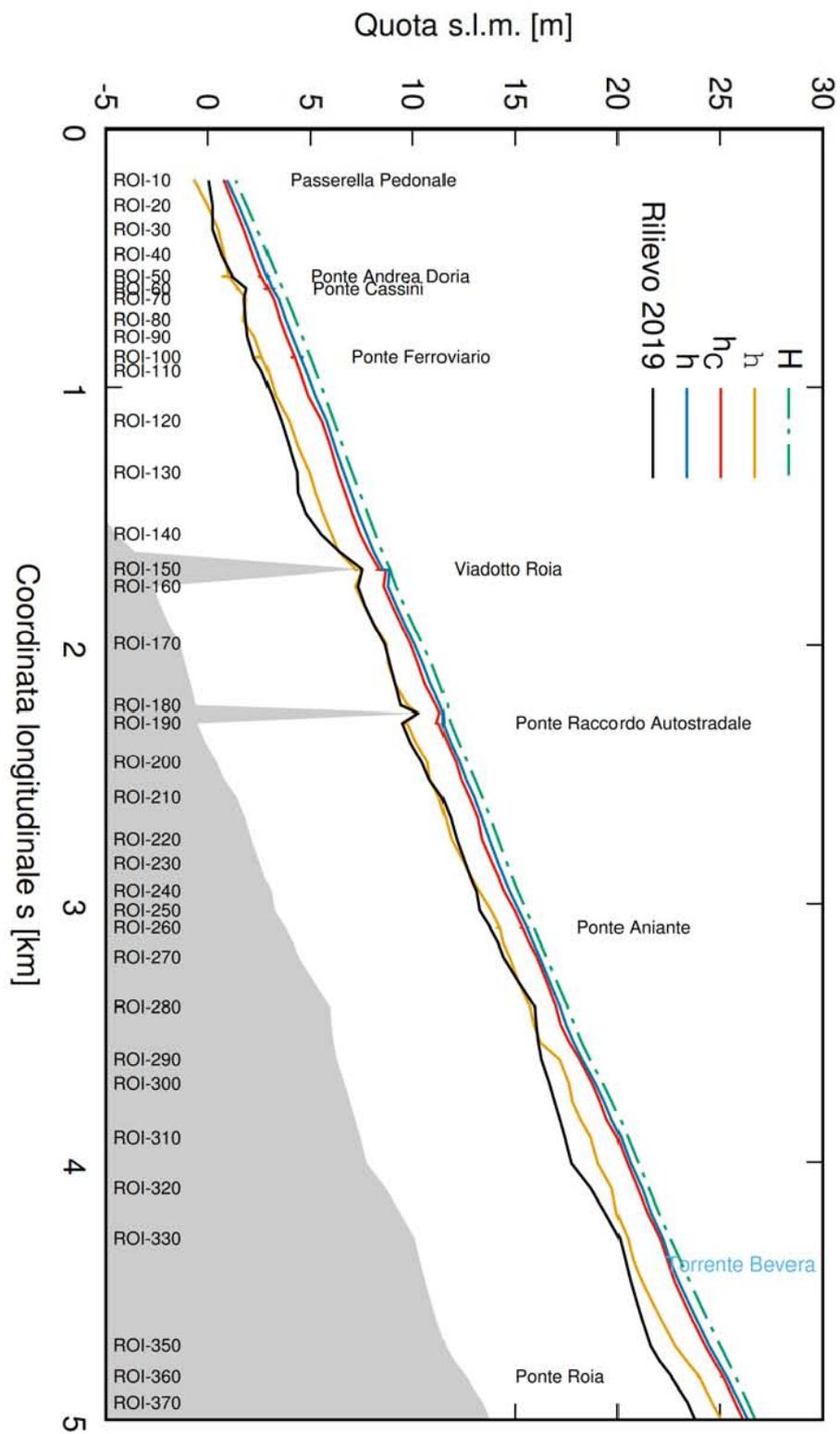


Figura 8: Tendenza evolutiva - Tratto tra la confluenza con il torrente Bevera e la foce.

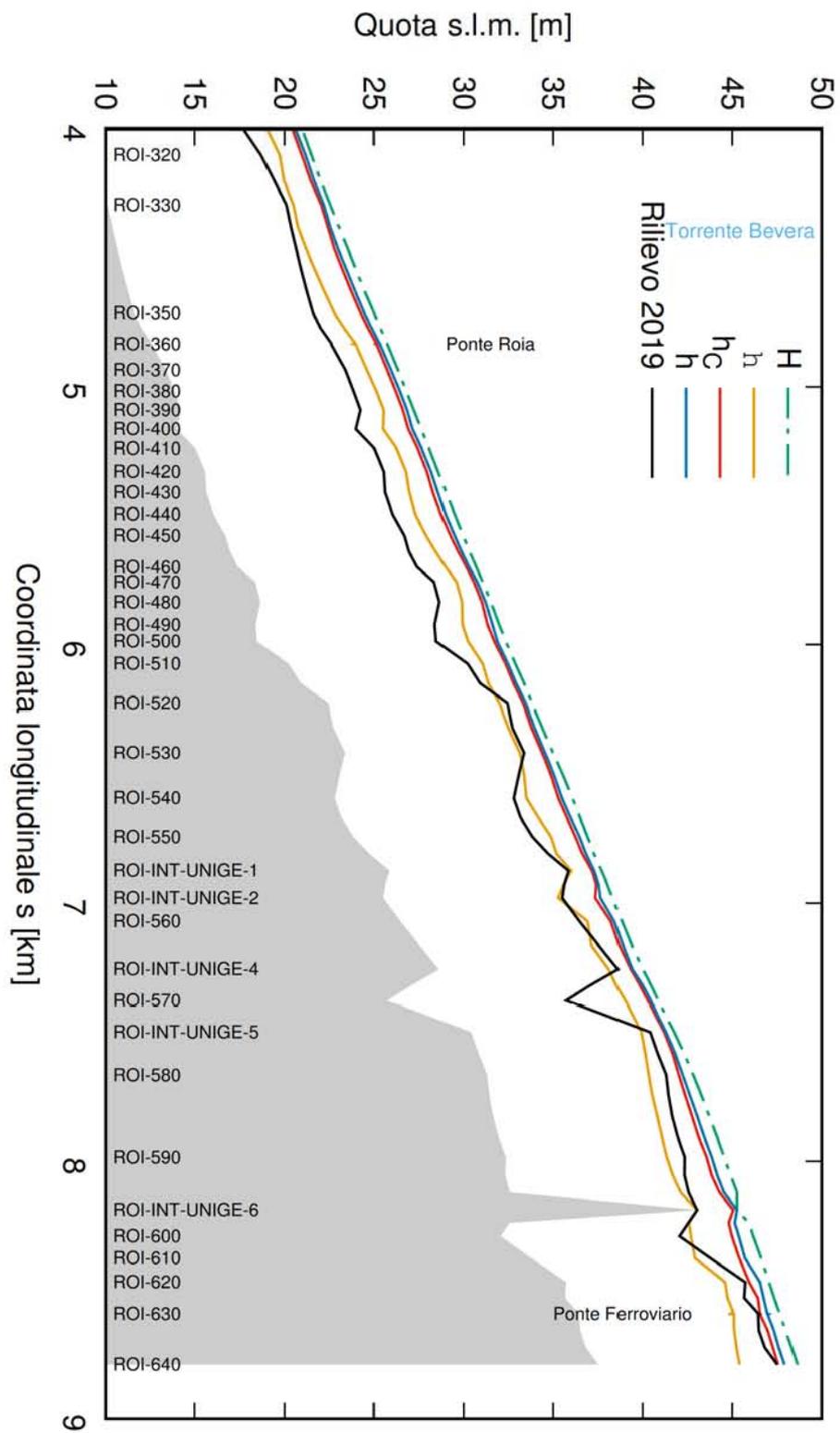


Figura 9: Tendenza evolutiva - Tratto tra la sezione roi-640 e la confluenza con il torrente Bevera.

tre, la curva molto stretta posta in corrispondenza di località Trucco (tra le sezioni roi-int-unige-2 e sezioni roi-int-unige-4) ha presumibilmente un effetto non trascurabile sulla dinamica della corrente e sul conseguente assetto di equilibrio del fondo che non può essere descritto nell'ambito del presente modello monodimensionale.

Nel complesso, l'analisi della tendenza evolutiva del tratto del fiume Roia considerato mostra una tendenza al deposito nel tratto del fiume Roia in corrispondenza della confluenza con il torrente Bevera, un sostanziale equilibrio nel tratto a monte delle due soglie e una tendenza al deposito in un breve tratto a valle della soglia del Viadotto Roia (sezione roi-150).

3.4.3 Il confronto con i rilievi storici

Risulta infine interessante sovrapporre i profili del fondo medio calcolato con la portata morfologica descritti nella sezione precedente con i rilievi storici presentati nella sezione 2, al fine di confrontare la tendenza evolutiva passata con quella simulata. Tale confronto è presentato nelle figure 10-11.

Nel tratto a valle della confluenza con il torrente Bevera (Figura 10) si può notare come vi sia una tendenza generalizzata a ripristinare l'assetto del fondo ad una quota intermedia tra il rilievo del 2019 e quello del 2002. Questa tendenza è osservabile in particolare per quanto riguarda l'erosione visibile nel rilievo 2019 tra le sezioni roi-150 e roi-80 e tra le sezioni roi-470 e roi-290, dove il profilo simulato appare più alto del profilo rilevato nel 2019, indicando quindi una tendenza al deposito, ma risulta generalmente più vicino all'assetto rilevato nel 2002 rispetto a quello del 2019.

Come già sottolineato, la tendenza erosiva riscontrata nel tratto di monte è da considerarsi con molta cautela a causa della curva posta in corrispondenza di località Trucco oltre che della presenza in quel tratto del già menzionato affioramento roccioso e di una erosione localizzata dell'ordine di 5 metri nella sezione roi-570 non facilmente interpretabile in termini di equilibrio morfodinamico.

Le considerazioni di cui sopra sono peraltro compatibili con i massicci prelievi di sedimenti avvenuti nel periodo 2004-2011 che hanno generato un'importante e diffusa erosione del tratto terminale del Roia, che il corso d'acqua non sembra sia stato ancora in grado di ripristinare.

3.4.4 Stima portata solida in ingresso

Appare utile a questo punto stimare l'apporto medio annuo di sedimenti in ingresso nel tratto di fiume Roia considerato. La presenza della stazione idrometrica di Airole posta circa 6 km a monte della sezione roi-640 ha con-

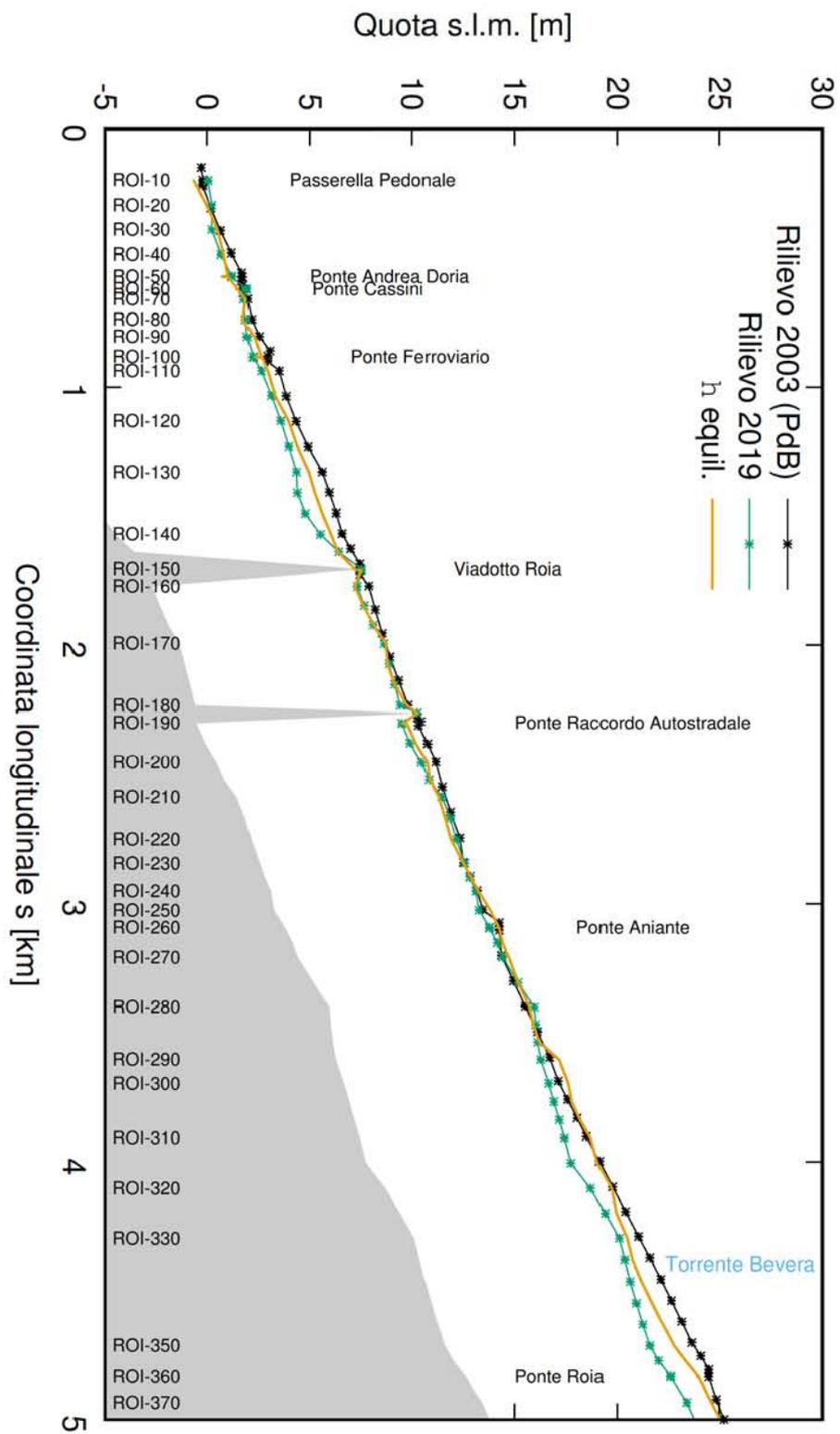


Figura 10: Confronto della tendenza evolutiva con rilievi storici - Tratto tra la confluenza con il torrente Bevera e la foce.

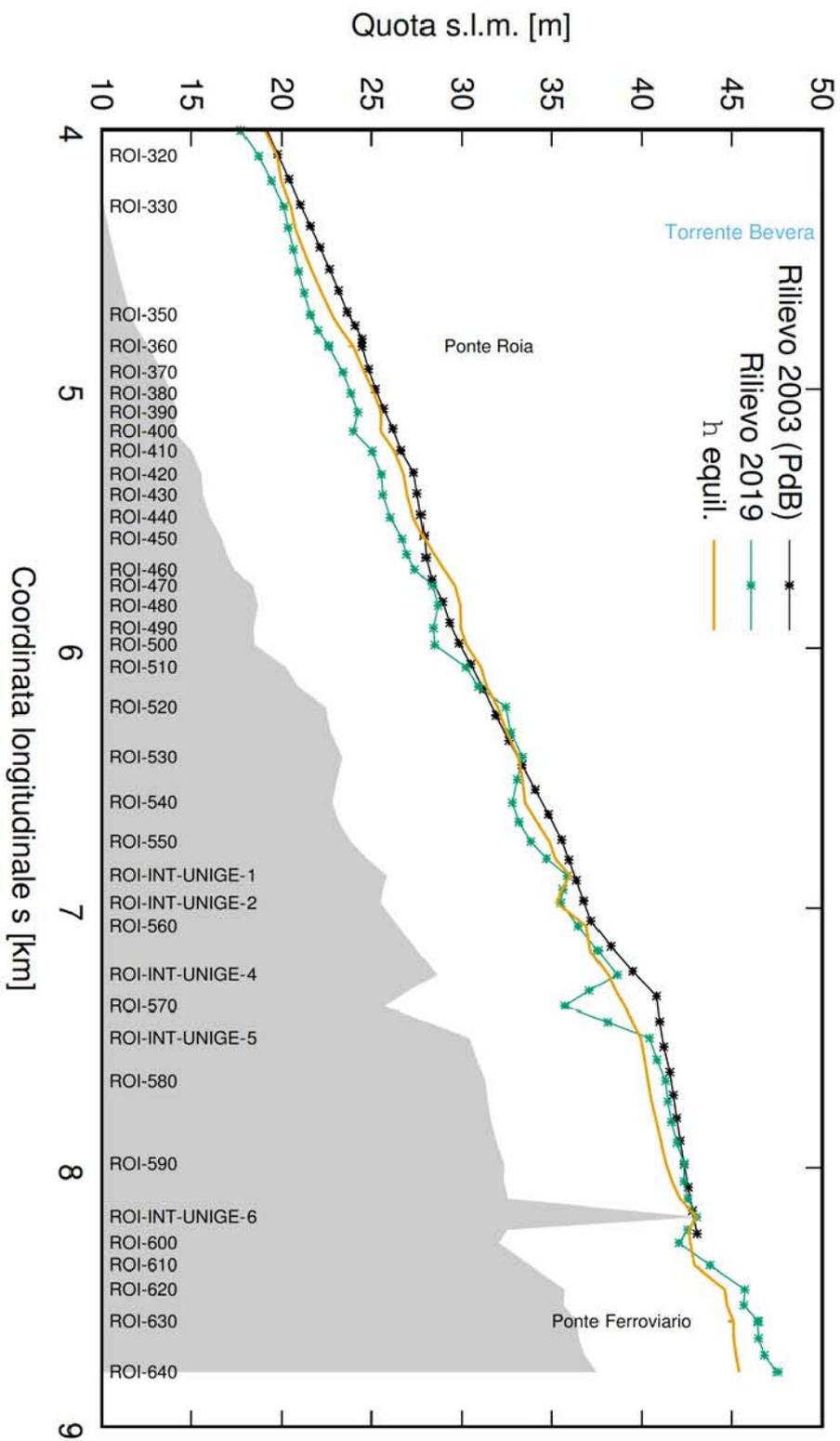


Figura 11: Confronto della tendenza evolutiva con rilievi storici - Tratto tra la sezione roi-640 e la confluenza con il torrente Bevera.

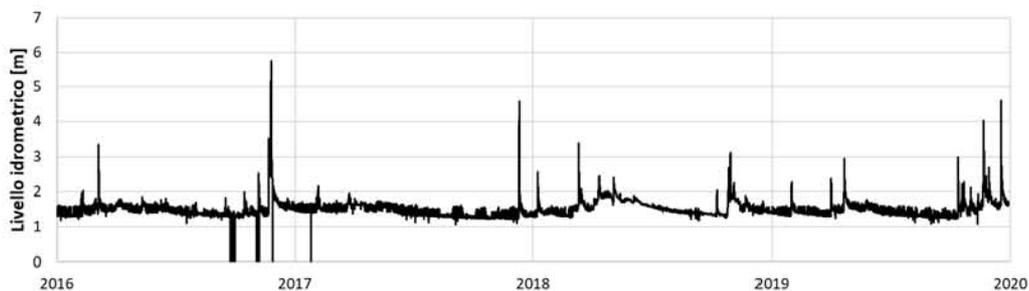


Figura 12: Livelli misurati alla stazione idrometrica di Airole (2016-2019).

sentito di ricostruire tale informazione. Nel tratto compreso tra la stazione idrometrica di Airole e la sezione di monte del tratto considerato (roi-640) non sono presenti affluenti rilevanti dunque è possibile assumere che la portata liquida si mantenga approssimativamente costante. Questa ipotesi è altresì dimostrata dalla modesta differenza tra i valori di portata corrispondenti a diversi tempi di ritorno presso la stazione di Airole e la sezione posta immediatamente a monte della confluenza con il torrente Bevera (tabella 2).

A tale fine sono state acquisite da ARPAL le letture di livello campionate a scala oraria per il periodo 2016-2019, oltre alle scale di deflusso utilizzate, negli anni, per la conversione livelli-portate. In Figura 12 sono riportate le letture in termini di livelli orari per il periodo 2016-2019. Pur con alcune lacune dovute a malfunzionamenti dell'idrometro o a interventi di manutenzione, il record temporale appare sufficiente per avere una stima di prima approssimazione dell'apporto di sedimenti medio annuo.

Utilizzando le scale di deflusso fornite da ARPAL, i livelli orari di Figura 12 sono stati convertiti in portate, ricostruendo così lo scenario idrologico che ha sollecitato il fiume nel periodo considerato. Una rapida analisi dei dati idrologici mostra che la massima portata registrata ($540 \text{ m}^3/\text{s}$) appare a novembre 2016 ed è associabile ad un tempo di ritorno pari a circa 7.5 anni. La portata con tempo di ritorno due anni, spesso indicata come portata morfologica rappresentativa corrisponde a circa $250 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre la media dei massimi annuali nel periodo è pari a circa $340 \text{ m}^3/\text{s}$. Permane, a detta dei tecnici interpellati, una certa incertezza per quanto riguarda in particolare la misura delle portate al colmo negli eventi di piena, che appare però superabile nel contesto del presente studio, ricordando che gli eventi morfologicamente più significativi sono quelli associati ad eventi di morbida più che di piena.

Va ricordato che, assumendo condizioni di moto uniforme e scegliendo un'opportuna formula di trasporto, all'idrogramma delle portate liquide misurato può essere associato un sedimentogramma, che, per ogni valore della portata liquida in ingresso, esprime la capacità di trasporto della corrente e

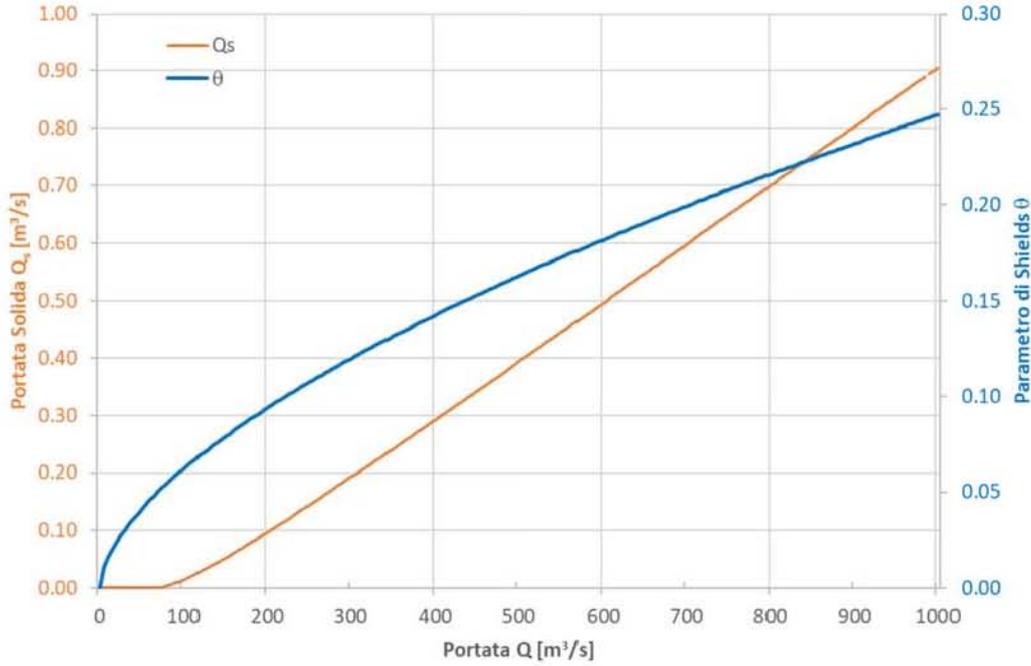


Figura 13: Capacità di trasporto e parametro di Shields in funzione della portata liquida in condizioni di moto uniforme.

quindi la portata solida in ingresso nel tratto considerato.

Nella Figura 13 è mostrata in blu la curva che esprime, per le diverse portate, la tensione adimensionale di Shields

$$\theta = \frac{RS}{(s-1)d_{50}} \quad (6)$$

dove R è il raggio idraulico (rapporto area/contorno bagnato), S è la pendenza media del tratto, s è la densità relativa dei sedimenti (2.65 per sabbia). In arancione, nella stessa figura, è riportata la curva che permette di stimare la portata solida, secondo la

$$Q_s = b_f \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \Phi(\theta) \quad \Phi(\theta) = 3.97(\theta - 0.0495)^{3/2} \quad (7)$$

dove b_f è la larghezza dell'alveo attivo a superficie libera e la portata solida adimensionale $\Phi(\theta)$ è stimata attraverso la formula di Wong & Parker (2006). Come si può notare, l'andamento della portata solida è caratterizzato dalla presenza di una soglia di attivazione per un valore di portata pari a circa $65 \text{ m}^3/\text{s}$ oltre il quale l'andamento risulta pressochè lineare.

Nel quadriennio considerato il volume complessivo di sedimenti in ingresso è stato stimato in circa 93000 m^3 (inclusa la porosità, assunta pari a 0.4).

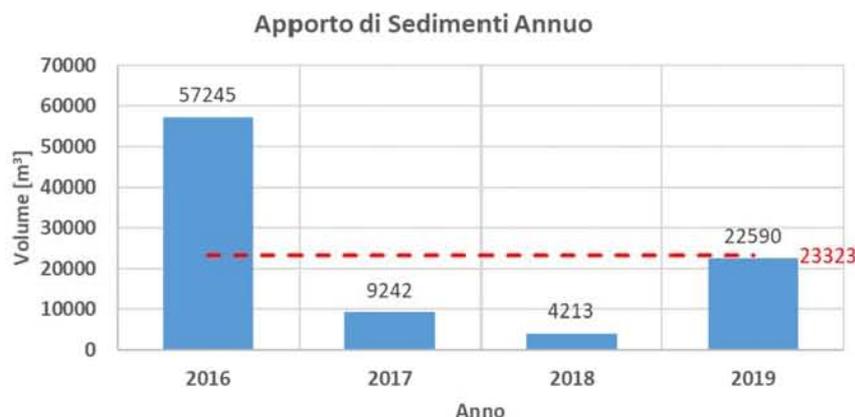


Figura 14: Apporto di sedimenti annuo stimato sulla base della ricostruzione dei sedimentogrammi in ingresso nel tratto considerato.

Mediamente si tratta di circa $23000 \text{ m}^3/\text{anno}$, come confermato anche dal grafico di Figura 14 dove sono rappresentati i volumi complessivi in ingresso nei diversi anni sulla base della ricostruzione dei sedimentogrammi. Nonostante i valori nei diversi anni siano piuttosto disomogenei, tale procedura consente di avere una stima dell'ordine di grandezza dell'apporto solido medio annuo in ingresso nel tratto terminale del corso d'acqua.

3.4.5 Stima del tempo scala per il ripristino del fondo di equilibrio

Il grafico in Figura 15 mostra l'andamento del volume in difetto nel 2019 (linea blu) e del volume in eccesso nel 2002 PdB (linea nera) rispetto al profilo di equilibrio in funzione della distanza dal mare. In particolare, allontanandosi dal mare il grafico riporta il deficit volumetrico di sedimenti complessivamente nel tratto posto a valle della sezione considerata. Come può notarsi, nel tratto di corso d'acqua considerato nel 2002 vi era un eccesso di sedimenti di circa 250000 m^3 mentre nella configurazione attuale (2019) il corso d'acqua mostra un deficit complessivo di circa 300000 m^3 nel tratto considerato. Se il flusso di sedimenti che proviene da monte stimato in $23000 \text{ m}^3/\text{anno}$ venisse interamente intercettato depositandosi nel corso d'acqua, la scala temporale necessaria per il raggiungimento delle condizioni di equilibrio morfodinamico sarebbe dell'ordine di 13 anni. Tuttavia, tale valore è da considerarsi come limite temporale inferiore in quanto in realtà il corso d'acqua riversa un flusso di sedimenti a mare mentre soltanto una parte dell'apporto di sedimenti proveniente da monte viene depositata nel tratto in questione. Per ottenere una stima più accurata della scala temporale sarebbe necessa-

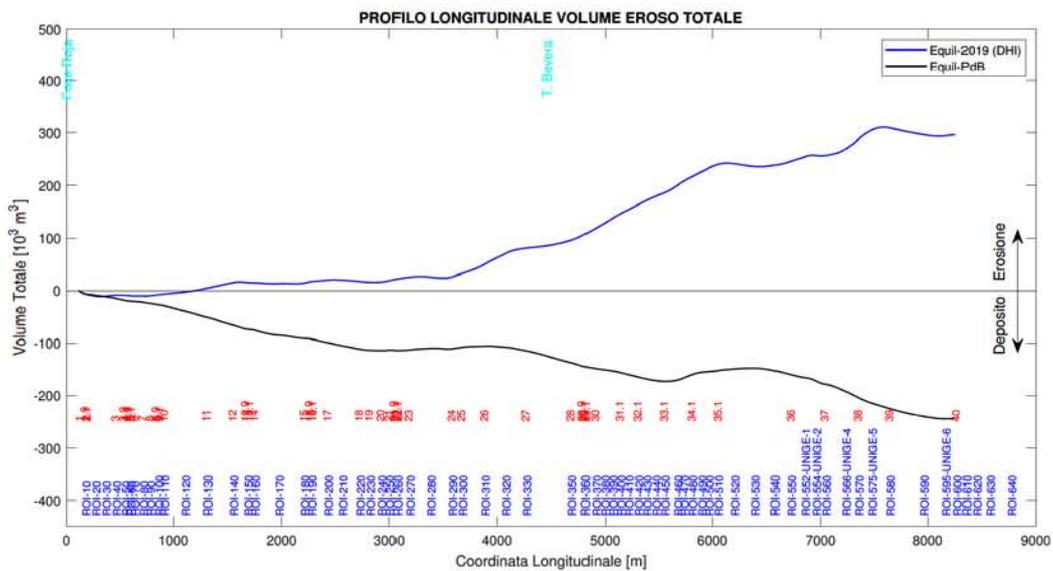


Figura 15: Volume in difetto nel 2019 (linea blu) e volume in eccesso nel 2002 PdR (linea nera) rispetto al profilo di equilibrio in funzione della distanza dal mare.

rio rimuovere l'ipotesi di equilibrio e adottare un modello a fondo mobile in grado di descrivere l'andamento spazio-temporale della quota del fondo nel tratto in esame.

4 Conclusioni

L'esempio di analisi morfodinamica di equilibrio descritto nel presente studio permette di svolgere alcune considerazioni sull'utilità di tali studi e, al tempo stesso, ne definisce alcuni limiti.

Innanzitutto, tali analisi forniscono un utile strumento per identificare la tendenza evolutiva di un corso d'acqua. Per quanto riguarda il fiume Roia, il confronto tra i rilievi del 2002 e del 2019 ha mostrato una erosione del corso d'acqua localizzata principalmente in un tratto di circa 2.5 km di lunghezza corrispondente alla confluenza con il torrente Bevera (tra le sezioni roi-460 e roi-290) e in un tratto di circa 1 km a valle della soglia posta in corrispondenza del Viadotto Roia (sezione roi-150) per un volume complessivo di circa 540000 m³. Lo studio ha nel complesso evidenziato una tendenza al deposito in questi due tratti dove è dunque prevedibile attendersi l'instaurarsi di un processo di progressivo innalzamento del fondo medio, che dovrà essere opportunamente monitorato in futuro.

Lo studio inoltre conferma il sostanziale equilibrio osservato nel tratto a valle della confluenza con il torrente Bevera e compreso tra le sezioni roi-150 e roi-280, anche grazie alle due opere fluviali presenti in alveo che lo regimano dal punto di vista morfodinamico.

Un altro aspetto per cui l'analisi di equilibrio può risultare rilevante riguarda la possibilità di evidenziare la presenza di tratti in sovralluvionamento, ovvero di tratti in cui il fondo attuale è superiore rispetto al fondo di equilibrio, poiché ciò potrebbe condurre ad un aumento del rischio di inondazione. Nel tratto del fiume Roia qui considerato, non si osservano rilevanti depositi alluvionali ad eccezione del tratto di monte dove tuttavia le valutazioni di equilibrio sono da considerarsi meno attendibili. Al contrario, i risultati di equilibrio mostrano che il corso d'acqua non è ancora stato in grado di ripristinare un assetto di equilibrio a valle dei massicci prelievi di sedimenti effettuati nel periodo 2004-2011. Tale osservazione è consistente con la quantificazione dell'apporto di sedimenti proveniente da monte, pari a circa 23000 m³/anno, basata sulla trasformazione delle registrazioni dei livelli idrometrici in sedimentogrammi presso la stazione di Airole nell'intervallo temporale 2016-2019, in quanto consente di stimare che la scala temporale nella quale il corso d'acqua raggiungerà la configurazione di equilibrio è certamente superiore alla decina di anni.

Lo studio dell'equilibrio morfodinamico consente inoltre di identificare la cosiddetta portata morfologica, cioè il valore di portata liquida (e solida) a cui è associato l'assetto del fondo alveo che meglio rappresenta il fondo rilevato. Oltre a costituire un passaggio chiave nella già discussa determinazione della tendenza evolutiva del corso d'acqua, la conoscenza della portata mor-

fologica consente di verificare in modo relativamente semplice l'effetto e la stabilità di eventuali interventi di sistemazione che prevedano di modificare localmente la geometria dell'alveo. In questi casi, sarà sufficiente analizzare la nuova soluzione di equilibrio ottenuta con la portata morfologica con la nuova geometria per osservare gli effetti a lungo termine dell'intervento proposto sull'assetto del fondo.

Si sottolinea infine come anche in questo contesto, così come per altri studi realizzati in passato, risulta fondamentale ai fini dell'analisi morfodinamica di equilibrio la disponibilità di un recente rilievo topografico di buon dettaglio nonché di rilievi storici o, quantomeno, di osservazioni di campo che consentano di individuare anche solo qualitativamente i tratti in equilibrio.

A Appendice: Ubicazione planimetrica delle sezioni sezioni PdB e 2019

Nelle figure seguenti (figure 16-21) sono presentati in successione, procedendo da monte verso valle, le posizioni delle sezioni corrispondenti al rilievo PdB e al rilievo DHI 2019 sovrapposti all'immagine satellitare.



Figura 16: Planimetria con indicazione delle sezioni.



Figura 17: Planimetria con indicazione delle sezioni.

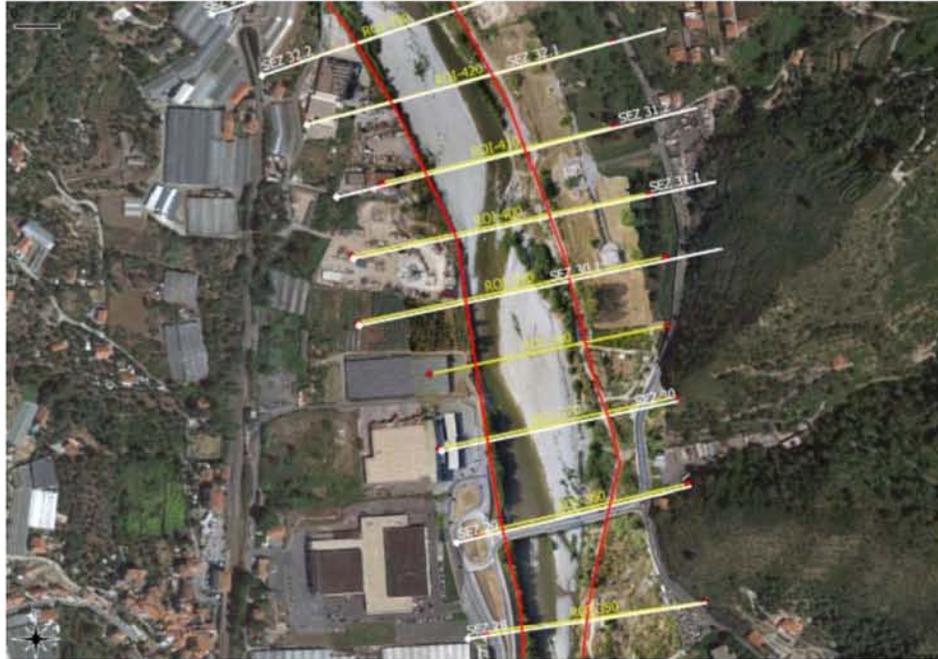


Figura 18: Planimetria con indicazione delle sezioni.



Figura 19: Planimetria con indicazione delle sezioni.



Figura 20: Planimetria con indicazione delle sezioni.



Figura 21: Planimetria con indicazione delle sezioni.

B Appendice: confronto sezioni PdB e 2019

Nelle figure 22-31 si riportano i confronti tra le sezioni corrispondenti per il rilievo 2002 Piano di Bacino e il rilievo 2019 DHI, mentre in figura 32 si riporta la distribuzione spaziale della larghezza dell'alveo attivo.

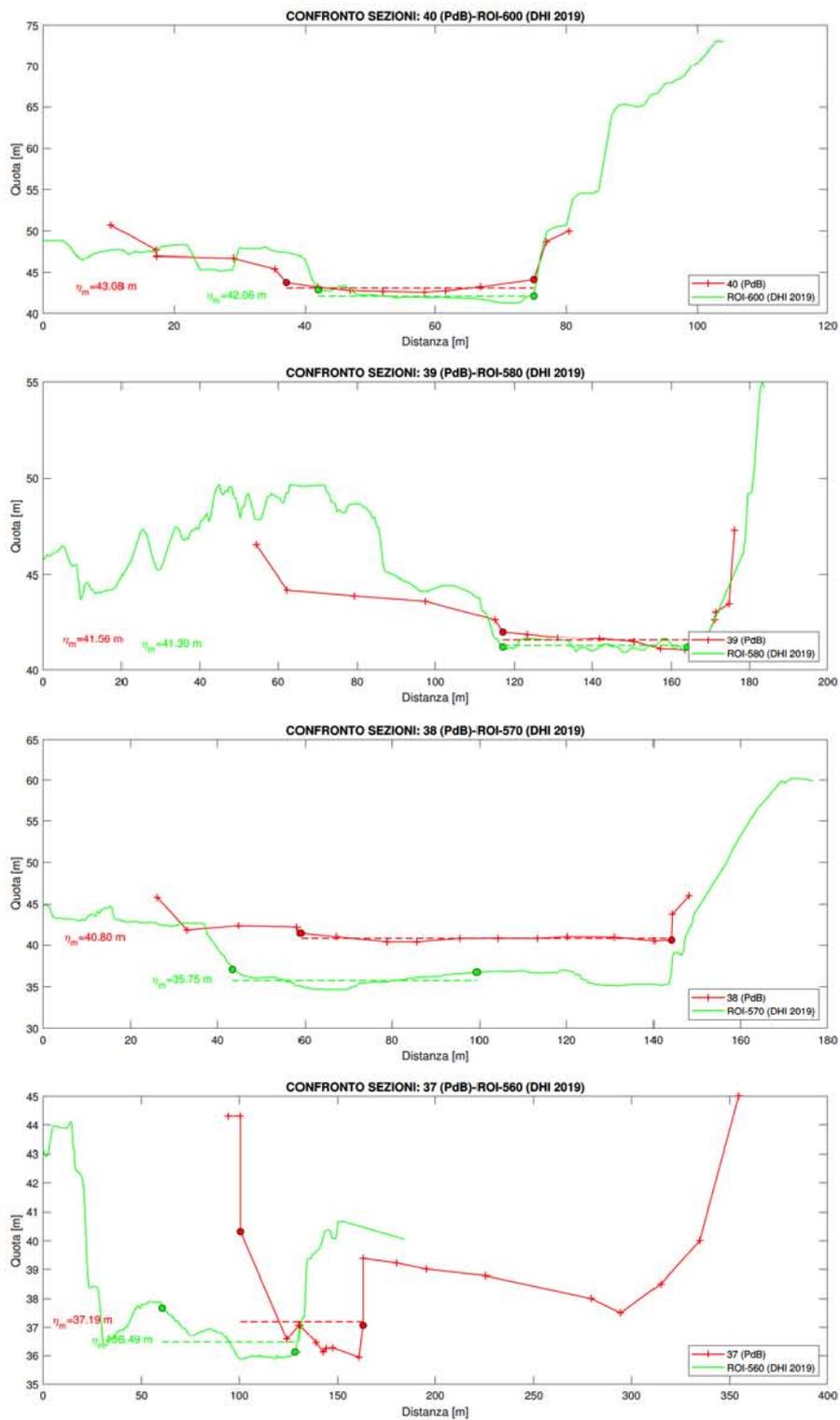


Figura 22: Confronto tra le sezioni del Piano di Bacino e quelle del rilievo DHI 2019.

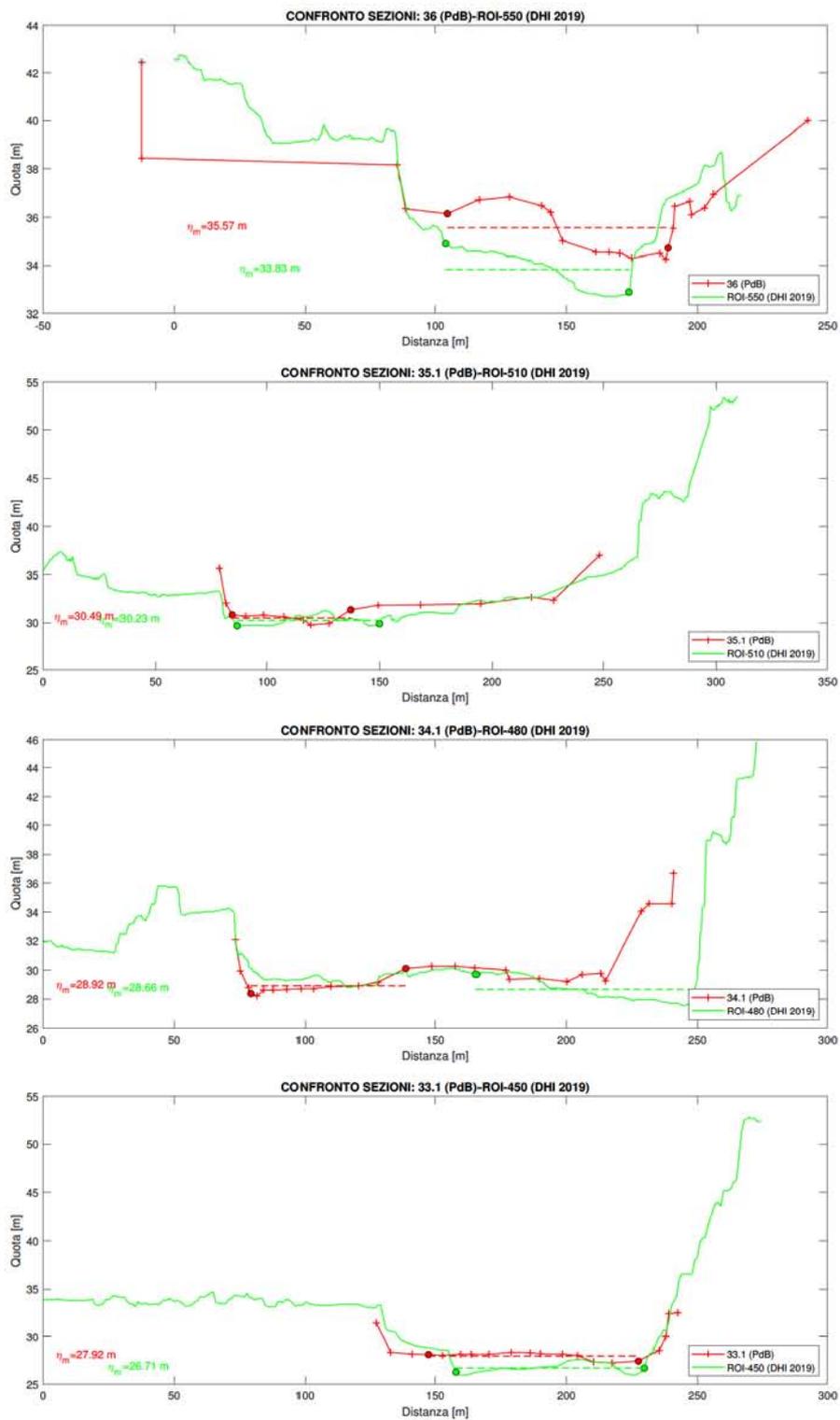


Figura 23: Confronto tra le sezioni del Piano di Bacino e quelle del rilievo DHI 2019.

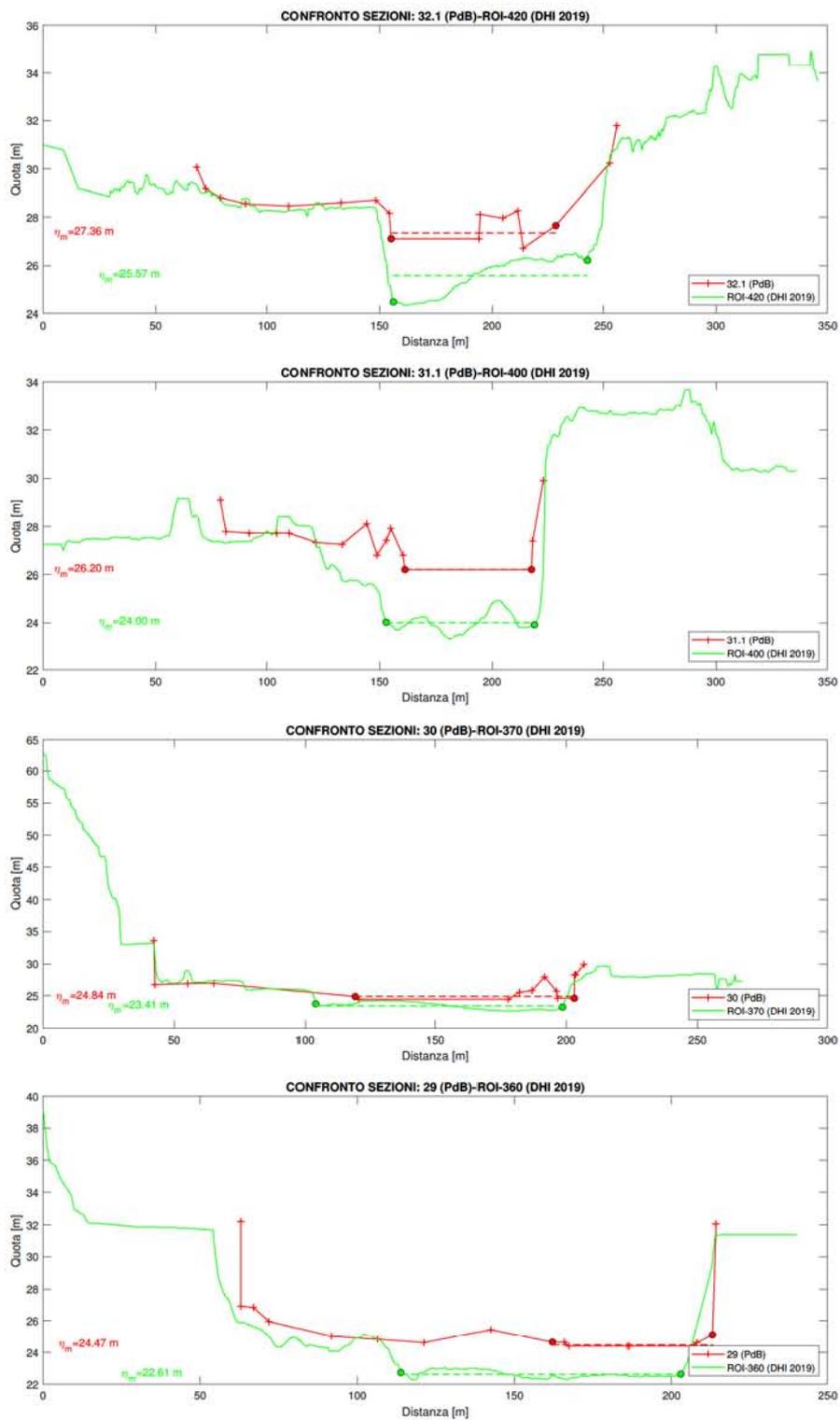


Figura 24: Confronto tra le sezioni del Piano di Bacino e quelle del rilievo DHI 2019.

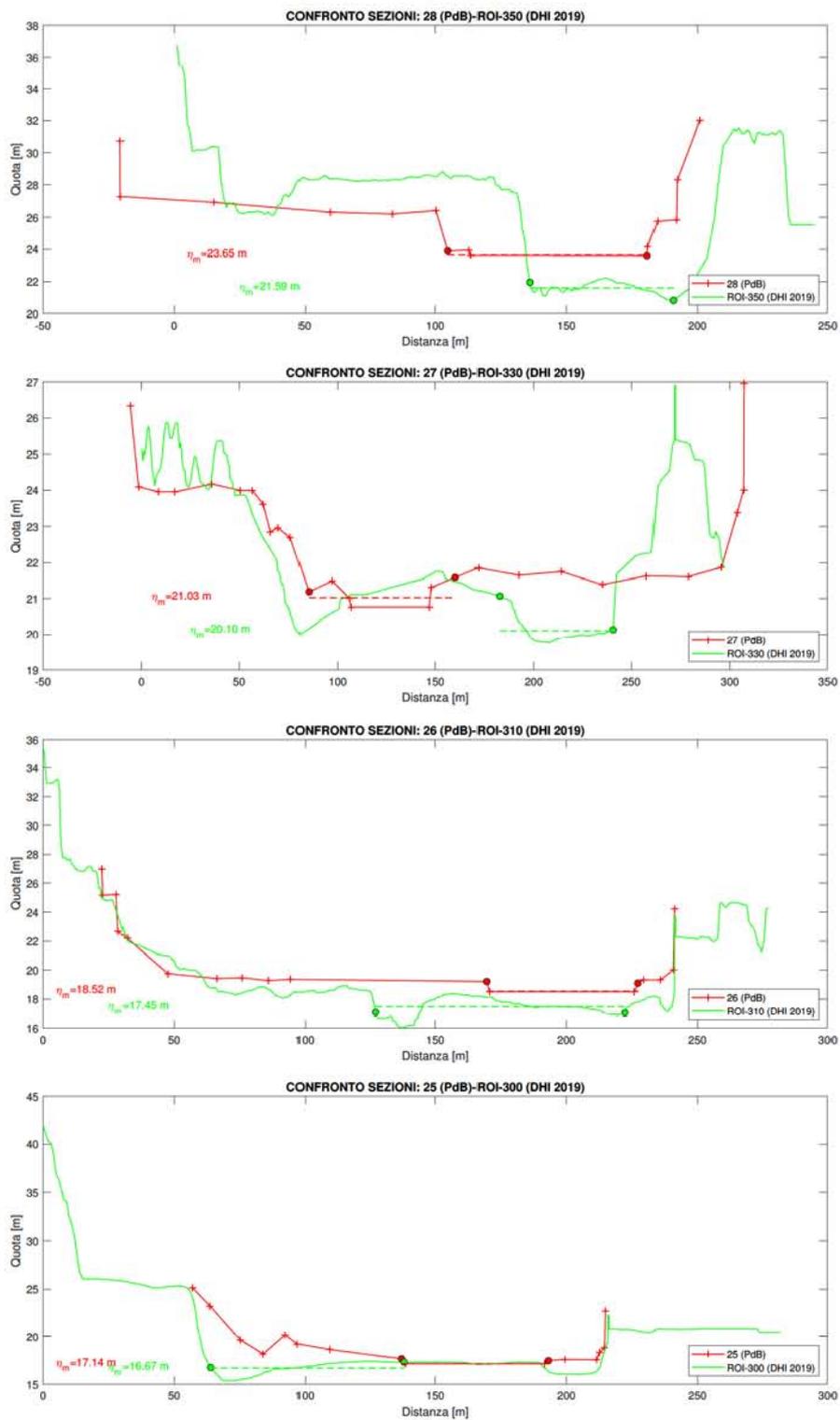


Figura 25: Confronto tra le sezioni del Piano di Bacino e quelle del rilievo DHI 2019.

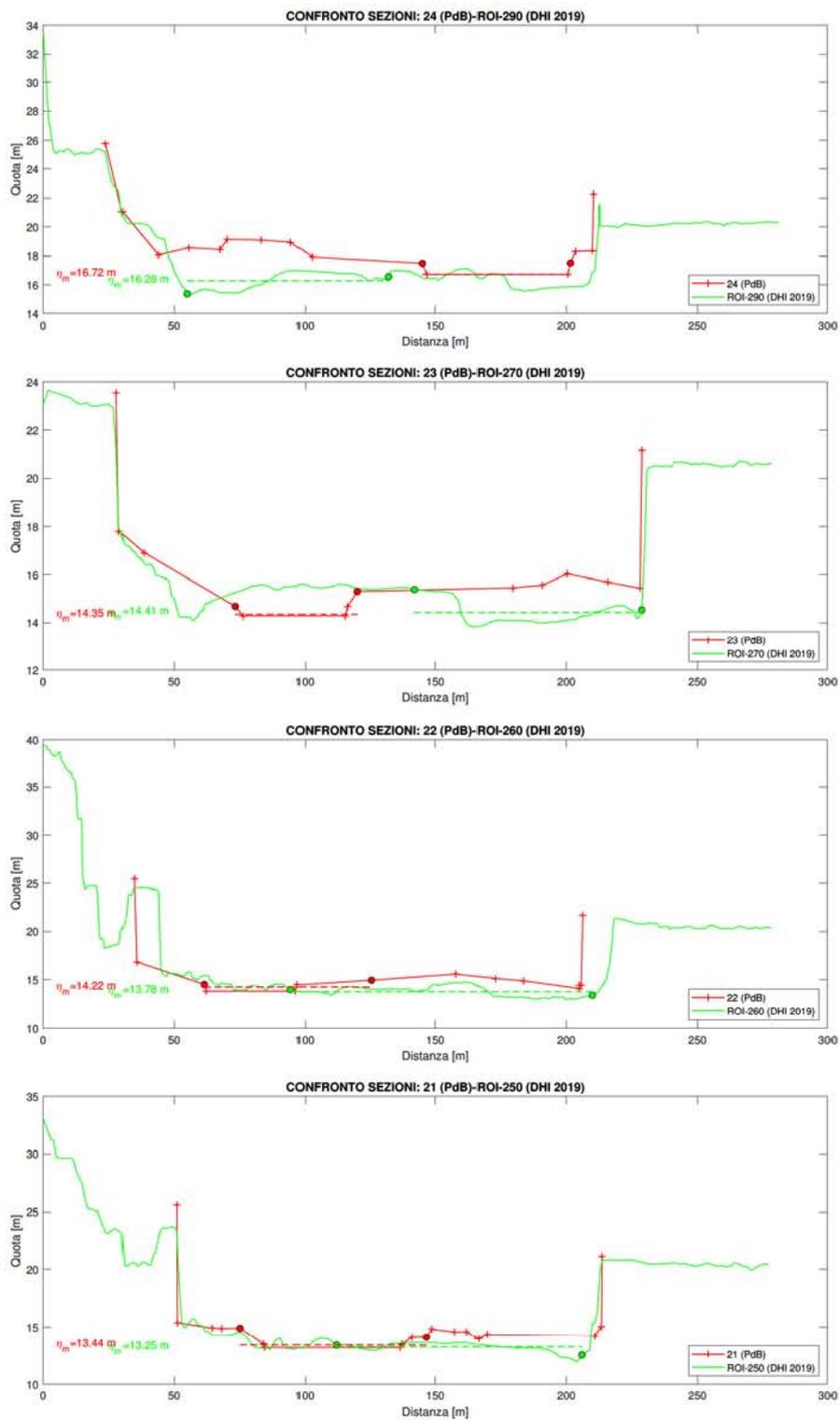


Figura 26: Confronto tra le sezioni del Piano di Bacino e quelle del rilievo DHI 2019.

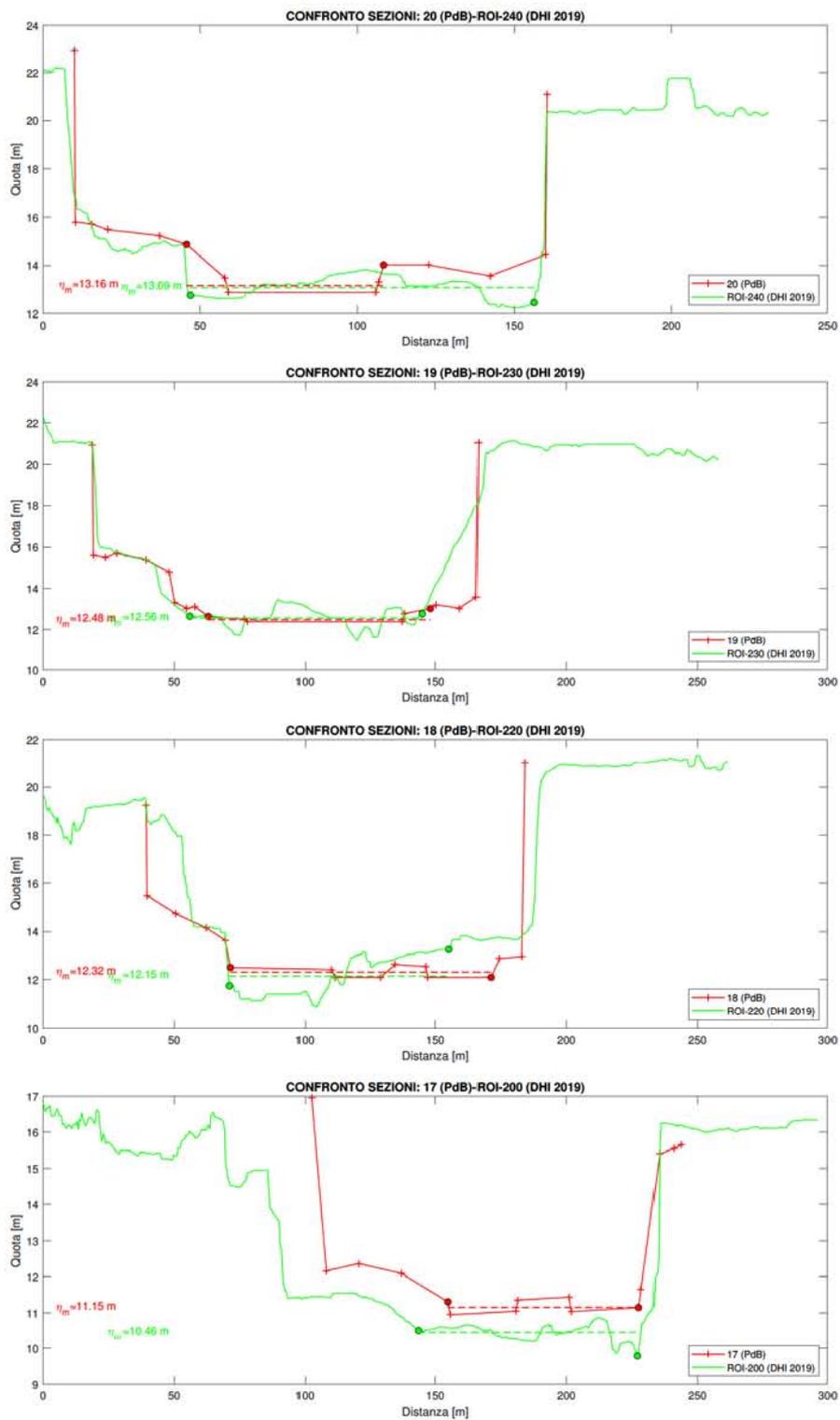


Figura 27: Confronto tra le sezioni del Piano di Bacino e quelle del rilievo DHI 2019.

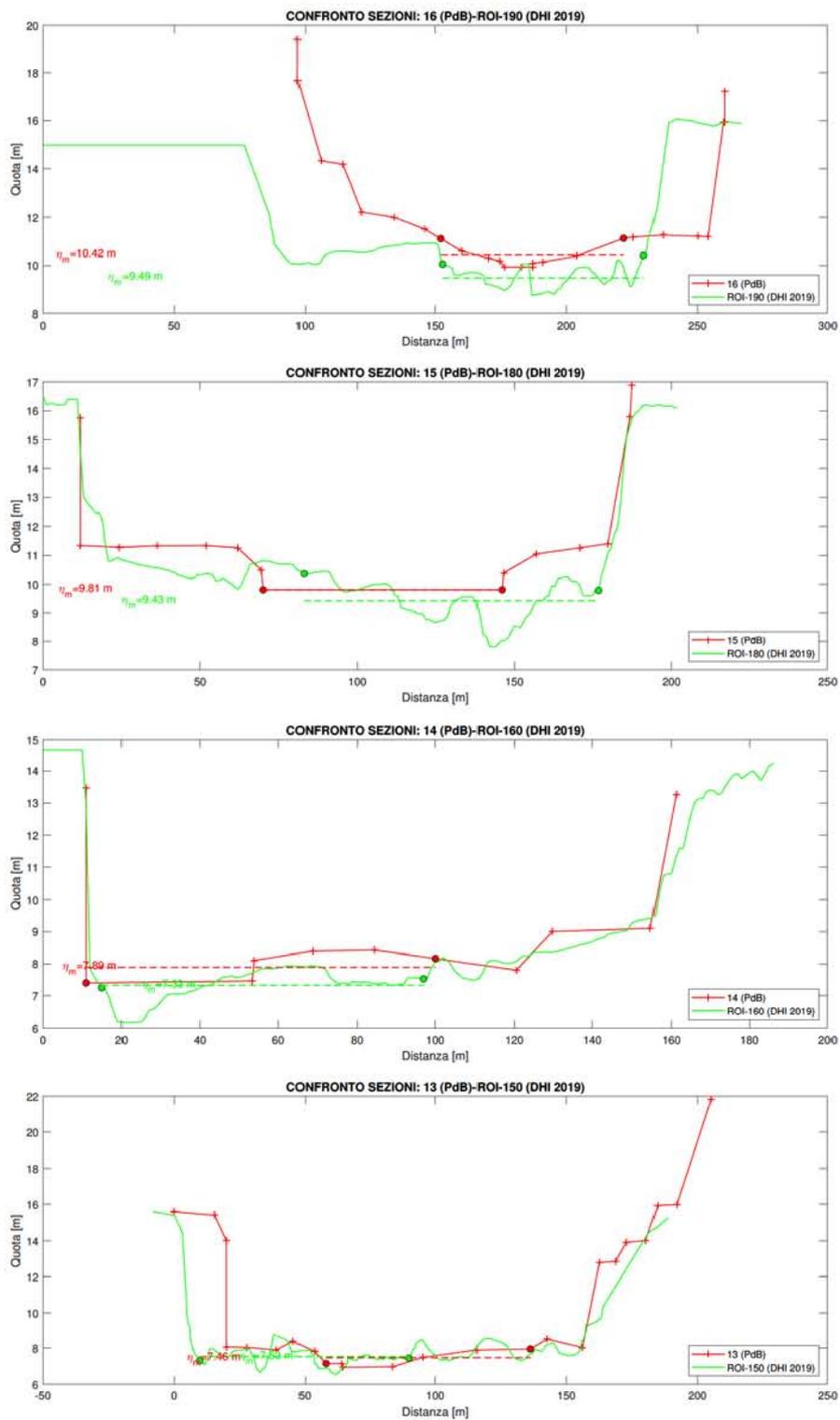


Figura 28: Confronto tra le sezioni del Piano di Bacino e quelle del rilievo DHI 2019.

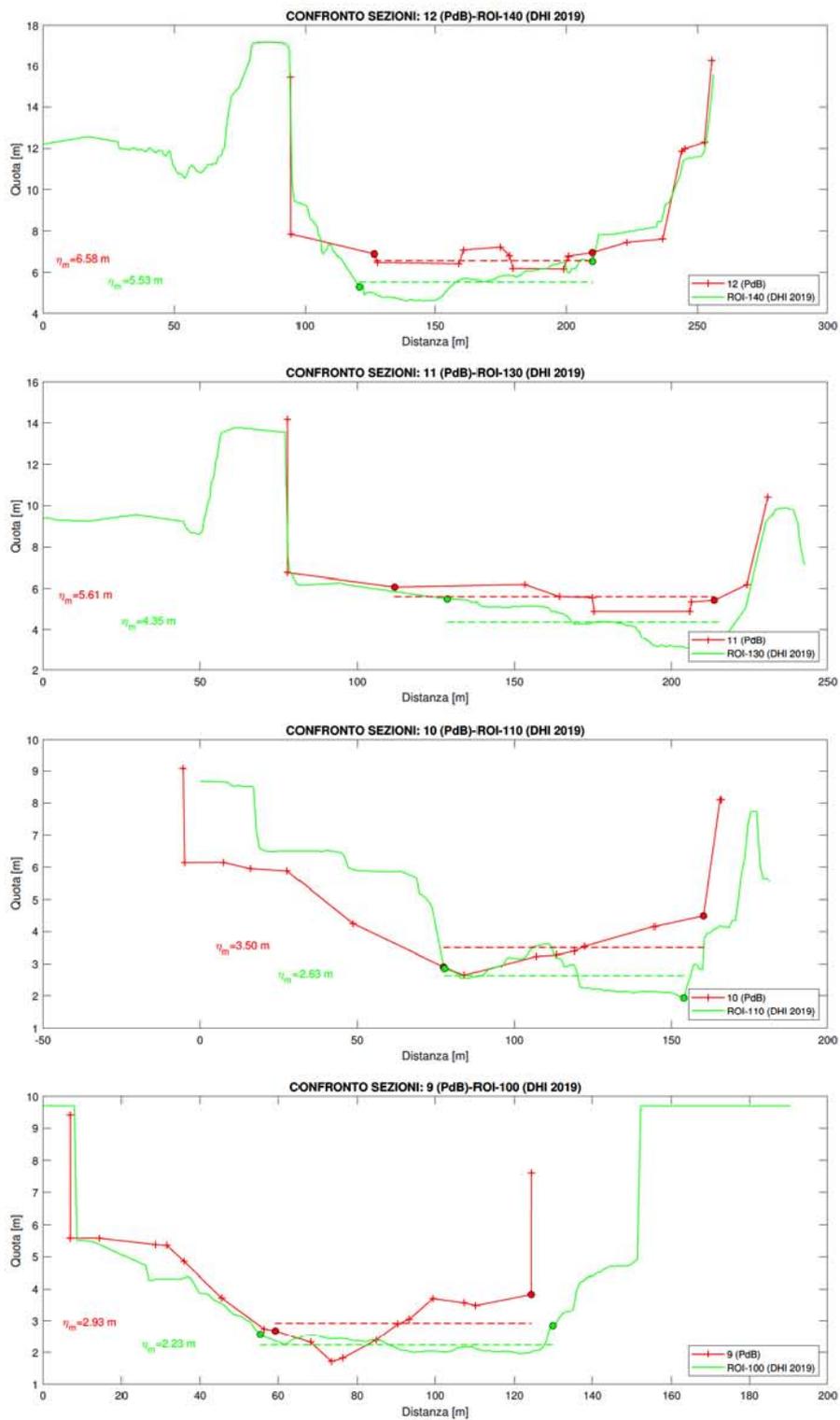


Figura 29: Confronto tra le sezioni del Piano di Bacino e quelle del rilievo DHI 2019.

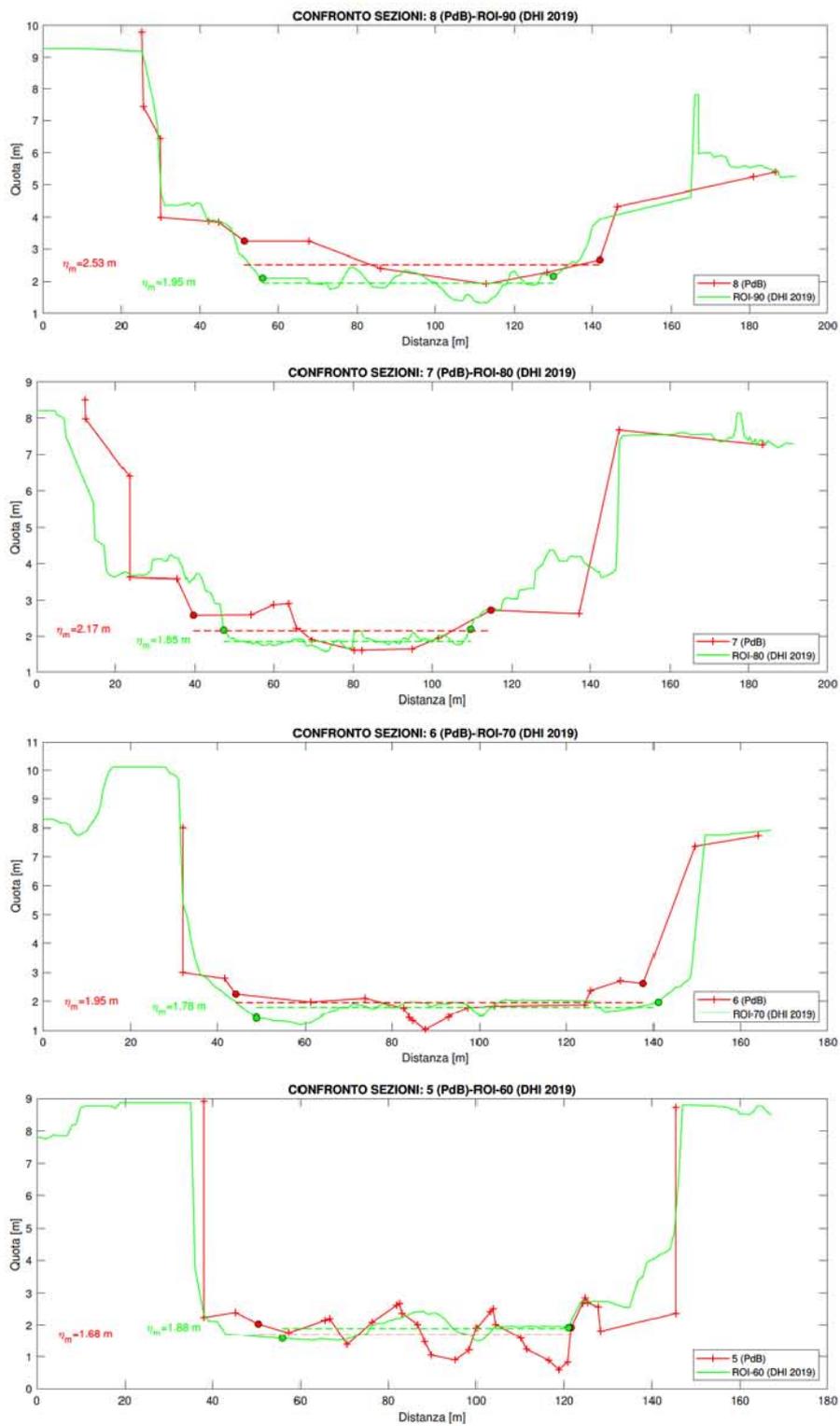


Figura 30: Confronto tra le sezioni del Piano di Bacino e quelle del rilievo DHI 2019.

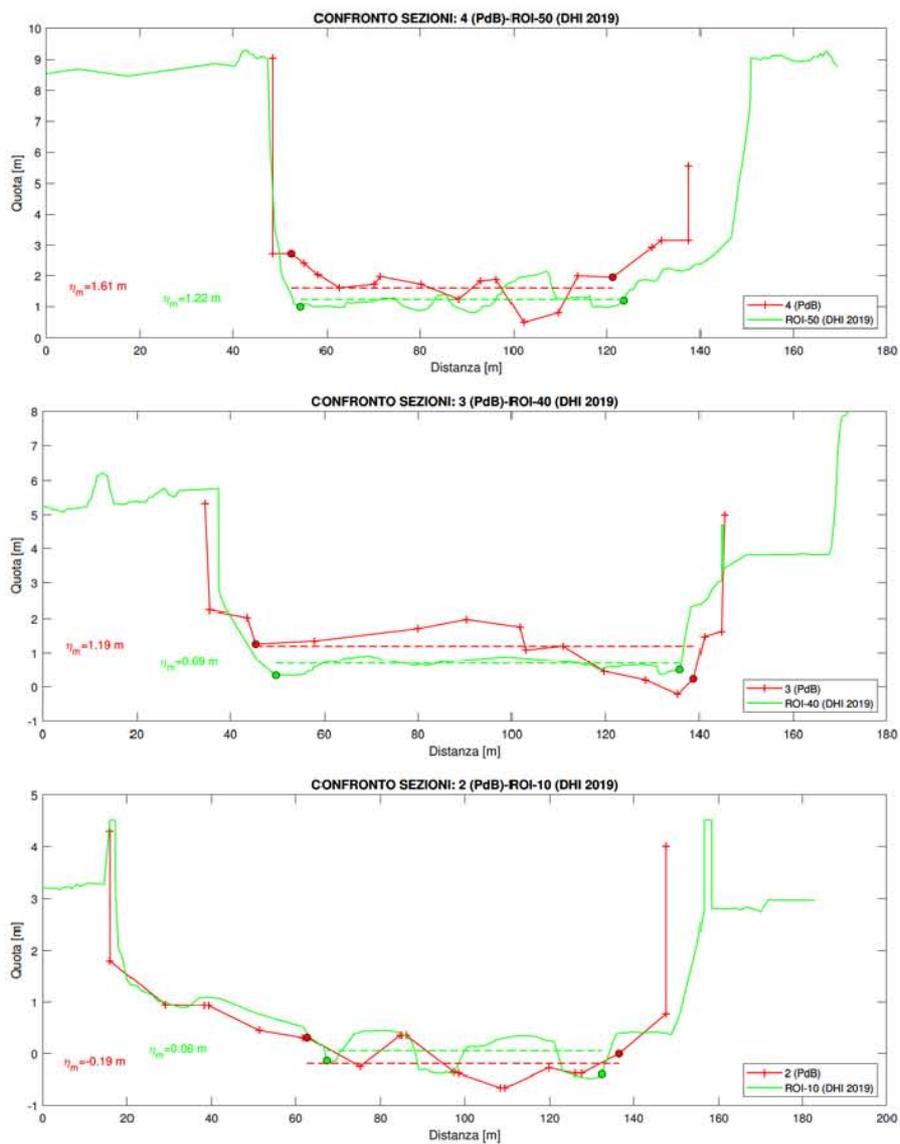


Figura 31: Confronto tra le sezioni del Piano di Bacino e quelle del rilievo DHI 2019.

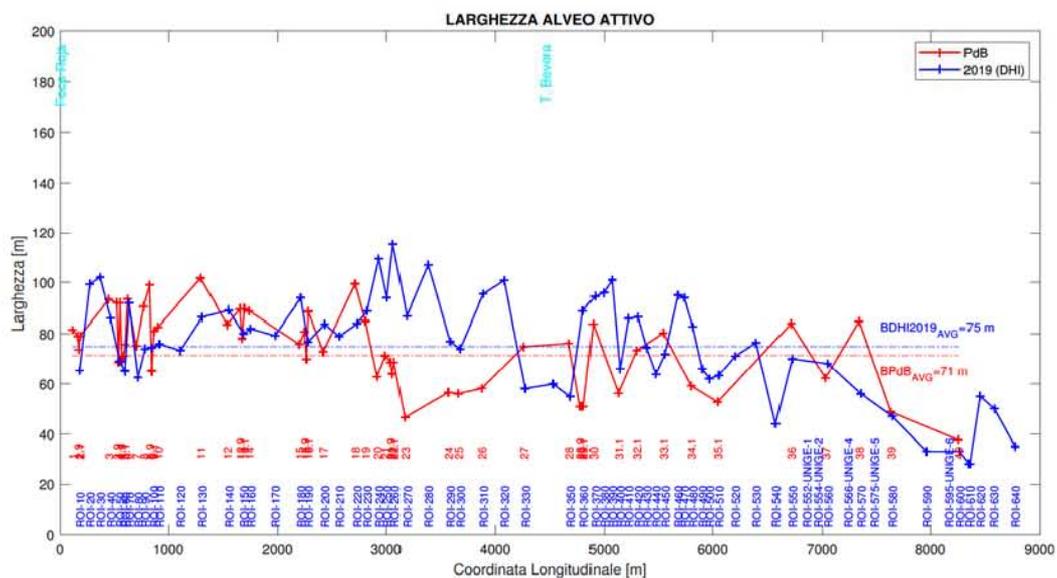


Figura 32: Larghezza dell'alveo attivo stimata dal rilievo del 2002 (linea rossa) e del 2019 DHI (linea blu) in funzione della distanza dal mare.