

IL RILIEVO ALTIMETRICO E BATIMETRICO DEL FIUME PO NEL TRATTO TRA CONFLUENZA TICINO E L'INCILE

Giorgio Camorani, Federica Filippi*, Armando Cavazzini**, Gianfranco Lombardo**, Gianluca Pappani**, Gianfranco Forlani***

* Autorità di bacino del fiume Po, Via Garibaldi, 75 – Parma – segreteria@adbpo.it

** Compagnia Generale Ripreseeree, Via Cremonese 35/a – Parma – info@cgrit.it

*** Università di Parma – Dip. Ing. Civile, V.le Usberti, – Parma – gianfranco.forlani@unipr.it

Riassunto

L'Autorità di bacino del fiume Po ha commissionato la realizzazione del DTM a passo 2m (inclusa la batimetria) e dell'ortofoto, a scala nominale 1:2.000, dell'asta di Po tra la confluenza Ticino e l'incile del Po di Goro. Sono stati impiegati, a tale fine, laser a scansione, correlazione di immagini da riprese aeree e, per la batimetria, un sonar a scansione su natante. Introdotta la finalità del rilievo, se ne illustrano le metodologie, i problemi affrontati e le verifiche effettuate, che indicano per i dati laser un errore quadratico medio di circa 15 cm.

Abstract

The Po river Authority produced a DTM of the Po river, including the river bed, from the Ticino river confluence to the outlet. Laser scanning data, digital image correlation on aerial images and bathymetric data collected by a sonar beam have been used. After introducing the purpose of the DTM, the flow-chart of the operations is presented; problems faced in areas with lack of GPS signal and in reconstruction of bathymetry and its connection to the elevation data are discussed. Results of independent checks on laser data show a rmse of less than 15 cm.

1. Introduzione

Nel corso delle attività di pianificazione e di studio condotte dall'Autorità di bacino del fiume Po negli anni, dalla redazione del Piano Assetto Idrogeologico (PAI) è emersa la centralità delle problematiche relative al rilevamento sistematico della morfologia dei corsi fluviali e delle aree inondabili.

La criticità maggiore è imputabile all'estrema frammentazione, e in alcuni casi all'assenza, per gran parte dei corsi d'acqua principali del bacino, di una rete di rilevamento e controllo della morfologia fluviale in correlazione anche alla rete di misure idrometriche e di portata.

I dati topografici disponibili sono spesso derivati da campagne di rilievi occasionali, geograficamente discontinue e incomplete oltre che spesso non adeguati a descrivere l'intera regione fluviale intesa come la porzione del territorio comprendente un corso d'acqua e le aree confinanti sede dei fenomeni morfologici, idraulici e naturalistico-ambientali connessi al regime idrologico del corso d'acqua stesso.

Più omogenea, anche se non ancora adeguata, è la situazione dell'asta del fiume Po, dove la caratterizzazione geometrica dell'asta principale è condotta a partire dalle sezioni trasversali topografiche individuate dalla Commissione Brioschi (Regio Decreto del 1873).

A partire dal 1950 le sezioni storiche sono state oggetto di rilevazioni periodiche, con cadenza media decennale, che hanno consentito di documentare le modificazioni morfologiche dell'alveo intercorse; le rilevazioni sono in parte relative all'intera sezione dell'alveo, tra i due argini maestri, e in parte limitate alla sola porzione incisa dell'alveo stesso. Per questo motivo e al fine di dare piena attuazione al Piano Assetto Idrogeologico (PAI), approvato con DPCM 24 maggio 2001, l'AdbPo ha realizzato alcuni Studi di fattibilità della sistemazione idraulica per i corsi d'acqua principali affluenti del Po e per il Po medesimo.

Tali Studi di fattibilità sono stati organizzati in due momenti: una prima fase, indirizzata alla formazione di nuova conoscenza del sistema idrografico oggetto di studio, che costituisce la base conoscitiva aggiornata per la progettazione degli interventi, una seconda fase orientata alla definizione progettuale della sistemazione idraulica e morfologica del corso d'acqua.

La prima fase è stata eseguita progettando e realizzando reti di monitoraggio plano-altimetrico del reticolo idrografico principale.

Per il fiume Po, data la complessità delle dinamiche evolutive da indagare e in ragione della importanza delle serie di dati storici disponibili, si è proceduto, anche in attuazione a quanto previsto dall'Accordo per la gestione dei sedimenti del 5 ottobre 2004 (sottoscritto da Autorità di bacino del fiume Po, AIPO, Regione Lombardia, Regione Emilia Romagna e Regione Veneto), ad una estesa e dettagliata campagna di rilievi condotta in collaborazione con l'Agenzia Interregionale per il Po (AIPO). Il programma dei rilievi ha interessato, per stralci, l'intera fascia golenale di Po, a partire dalla confluenza Pellice sino al mare (vedi tabella 2). Il rilievo eseguito nel 2004 è stato oggetto di due comunicazioni alla Conferenza nazionale ASITA dello stesso anno.

Tab. 1- Rilievi topografici del fiume Po, anni 2004 e 2005

Anno	2004	2004	2005	2005
Ente appaltante	<i>AdbPo</i>	<i>AIPO</i>	<i>AIPO</i>	<i>AdbPo</i>
Tipo di rilievo	<i>Rilievo laser-scan</i>	<i>Rilievi topografici tradizionali</i>	<i>Rilievi topografici tradizionali</i>	<i>Rilievo laser-scan</i>
Prodotti	<i>DSM cella 2x2 m DTM cella 2x2 m Breaklines Ortofotocarta pixel 20 cm</i>	<i>Rete di raffittimento planoaltimetrica della rete IGM95 Sezioni topografiche trasversali Rilievo 0 idrometrico Rilievo profili arginali</i>	<i>Rete di raffittimento planoaltimetrica della rete IGM95 Sezioni topografiche trasversali Sezioni topografiche dei manufatti di attraversamento Rilievo 0 idrometrico Rilievo profili arginali</i>	<i>DSM cella 2x2 m DTM cella 2x2 m DTM batimetrico cella 2x2 m Breaklines Ortofotocarta pixel 20 cm</i>
Ambito	<i>fascia C di Po da confluenza Pellice a confluenza Ticino</i>	<i>fascia C di Po da Torino a confluenza Ticino</i>	<i>fascia B di Po da confluenza Ticino al mare</i>	<i>fascia B di Po da confluenza Ticino all'incile del Po di Goro</i>

Il rilievo condotto nel 2005, oggetto di questa comunicazione, ha interessato l'asta del fiume Po (da argine ad argine, con ampliamenti nelle zone di confluenza degli affluenti) per una lunghezza complessiva di circa 340 km e per un'estensione di circa 740 km².

Il DTM, con maglia di 2 m, ha tolleranza di 20 cm per le quote ellissoidiche e 50 cm per le quote ortometriche. I punti rilevati, classificati in insiemi diversi, permettono di generare diversi tipi di DTM: del terreno idraulico, del terreno "naturale", delle strutture sovra/sottomontanti il medesimo, ecc.

Di particolare rilevanza è la produzione del DTM batimetrico del fiume Po, con risoluzione di 2 m, ad integrazione della ripresa aerofotogrammetrica stereo e della produzione di ortofoto digitali.

La Compagnia Generale Ripreseeree si è aggiudicata la gara d'appalto e il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Parma ha fornito assistenza alla direzione lavori e nella verifica dei prodotti.

Nel seguito, vengono illustrate le linee di sviluppo del lavoro e le principali problematiche affrontate, in particolare le caratteristiche dei voli di ripresa, la produzione del DTM in una zona priva di segnale GPS, l'integrazione tra batimetria e altimetria, le verifiche di qualità.

2. Metodologie di rilievo

Rispetto all'analogo progetto che ha interessato il tratto torrente Pellice – Ticino (Banchini et al, 2005) si sono presentate due problematiche nuove, costituite dalla rilevazione della batimetria e dalla presenza di una zona preclusa al rilievo laser a causa della assenza di segnale GPS. Nel seguito, dopo aver brevemente riassunto l'impostazione generale del rilievo con dati riassuntivi, ci si concentrerà su questi due aspetti.

2.1 Rete di inquadramento e appoggio.

Il rilievo è inquadrato rispetto a vertici della rete IGM95, attraverso la determinazione ridondante dei siti per le stazioni master di assistenza al volo e di una serie di punti di appoggio e controllo del volo fotogrammetrico nonché di piani quotati per la verifica della georeferenziazione del dato laser.

2.2 Voli laser

Sono stati impiegati due scanner differenti (Optech ALTM 3033 e Toposys Falcon II) da quote relative di circa 1500 m; con l'ALTM 3033 sono state eseguite 123 strisciate con un abbracciamento di 1090 metri ed uno sviluppo complessivo di 1060 chilometri mentre con il Falcon II, il cui abbracciamento da quella quota è di soli 390 metri, sono state eseguite 75 strisciate con uno sviluppo di 651 chilometri. L'intero lavoro ha quindi comportato l'esecuzione di 198 strisciate con uno sviluppo di 1711 chilometri; il ricoprimento trasversale tra strisciate adiacenti è sempre risultato maggiore del 35%.

Le riprese aerofotogrammetriche a colori per realizzare le ortofoto digitali, non contemporanee al rilievo laser, sono state effettuate con camera grandangolare Wild RC30 interfacciata al sistema POS-AV-510-DG dell'Applanix; le immagini, alla scala media 1:9600, sono state acquisite in forma numerica a 1200 DPI ovvero con una risoluzione al suolo di circa 20 cm.

2.3 Voli fotogrammetrici per DTM

Una porzione consistente del rilievo (circa 51 kmq su un totale di 740 kmq) è stata realizzata esclusivamente a partire dal rilievo fotogrammetrico, a causa dell'assenza di segnale GPS in un'area approssimativamente compresa tra Polesine Parmense, Torricella del Pizzo e Coltaro. Il blocco relativo all'area priva del rilievo laser, volato con camera grandangolare dalla quota relativa di 1450 m circa), è stato appoggiato in modo tradizionale su punti rilevati con stazioni GPS a terra (a terra infatti la zona priva di copertura è assai limitata e il segnale GPS è presente o scompare "a macchia di leopardo") con sbracci (baseline singole). Per l'orientamento è stato impiegato un programma di triangolazione aerea automatica (Match-AT) che sceglie e riconosce automaticamente i punti di legame. Dati i parametri di volo e la precisione della correlazione di immagini, la restituzione dovrebbe avere precisioni in quota di 15-20 cm.

L'impiego della correlazione è limitato alle zone aperte (ovvero prive di vegetazione ed edifici), delimitate preliminarmente da polilinee. Altrove si procede invece alla restituzione mediante collimazione manuale. Al termine l'operatore controlla il risultato osservando la sovrapposizione della maglia dei punti correlati sul modello stereoscopico, correggendo eventuali errori.

Per i vincoli propri del programma di correlazione, la densità di campionamento risulta circa 10 volte inferiore a quella del laser; tuttavia considerate le caratteristiche dell'area, in prevalenza pianeggiante, e l'introduzione delle breaklines, laddove il terreno presenta discontinuità, non ci si deve attendere un peggioramento della qualità del prodotto in quanto un passo di campionamento di 6 m in zone piane è certamente sufficiente.

2.4 Rilievo batimetrico

Il rilievo batimetrico, con sensore multibeam è stato svolto in collaborazione con l'Agenzia Regionale per la Navigazione Interna (ARNI), che ha messo a disposizione l'imbarcazione, il personale e la strumentazione necessaria per eseguire la raccolta dei dati ed ha elaborato i dati batimetrici. Il periodo del rilievo, svolto tra gennaio e ottobre 2005, è stato contraddistinto da valori dei livelli idrometrici estremamente bassi, tra i minimi storici registrati negli ultimi 100 anni.

In alcune tratte non è stato possibile registrare l'intero alveo di magra del fiume a causa del regime di magra eccezionale, per cui il rilievo è stato limitato alle sole zone dove il fondale permetteva una navigazione sicura per l'imbarcazione e la strumentazione. Questo perché mentre a valle dello

sbarramento di Isola Serafini il fiume è quasi sempre navigabile, a monte presenta ancora caratteristiche di flusso multicanale dove non è sempre garantita la navigabilità; questa parte è stata più difficoltosa l'esecuzione del rilievo nonostante sia stato effettuato nel periodo di morbida primaverile; infatti per tutta la durata del rilievo i livelli idrometrici del fiume sono stati sempre molto bassi rendendo il rilievo particolarmente difficile e problematico.

Il rilievo è stato eseguito utilizzando una imbarcazione Rio 800 Cabin Fish e un multibeam Kongsberg EM 3000D. La profondità operativa del sistema varia tra circa 1 m e 150 metri, il massimo "swath" è pari a 10 volte la profondità del fondale. Prima di avviare le operazioni di rilievo è stata effettuata una accurata calibrazione del sistema.

Per rilevare l'intero alveo inciso sono stati effettuati dei profili longitudinali paralleli con sovrapposizione laterale al fine di avere un maggiore controllo sui ping più esterni. Considerate le profondità medie del fiume Po (circa 3.5 m) e le larghezze medie delle sezioni (350 m) si è ottenuta mediamente una copertura completa del fondo con circa 10 passate.

Durante il rilievo, il software del sistema multibeam visualizza in tempo reale un primo modello di fondale dai dati grezzi "raw" e non filtrati. Successivamente tramite il software Neptune® si è proceduto alla fase di post processing dei dati raw eliminando quei dati ritenuti non validi.

Questi dati sono stati processati manualmente e automaticamente per rimuovere i picchi spuri, sincronizzare i dati di posizione e di profondità, compensarli in base ai movimenti dell'imbarcazione (beccheggio, rollio, ecc.) ed omogeneizzarli in funzione delle escursioni del livello idrometrico. Una volta terminata la fase di post processing, con il software CFLOOR® viene prodotto un DTM preliminare a passo 2 m, utilizzato per controllare l'accuratezza dei dati e successivamente per documentarne i risultati.

2.4.1 Aree oggetto del rilievo

Il rilievo batimetrico è stato suddiviso in due blocchi, a monte e a valle dello sbarramento ENEL di Isola Serafini, che introduce nel rilievo una discontinuità, impedendo di collegare le due tratte.

Per ogni tratta è stato utilizzato un unico idrometro di riferimento, per cui le profondità misurate hanno come riferimento il medesimo zero idrometrico. Questo procedimento ha consentito anche di collegare tratte contigue, svincolandole dalle oscillazioni idrometriche.

L'omogeneizzazione idrometrica è stata realizzata utilizzando i valori registrati ogni mezzora dagli idrometri della rete CAE con riferimento al proprio zero idrometrico.

2.4.2 Integrazione dei dati batimetrici nel rilievo laser

Essendo il ricevitore GPS a bordo di tipo monofrequenza, il posizionamento altimetrico dei dati di profondità ha un'accuratezza insufficiente; per convertire le misure di profondità in quote ortometriche si è proceduto a rendere tutte le misure effettuate in periodi diversi paragonabili tra di loro attraverso il riferimento all'idrometro più vicino.

In pratica, le variazioni di livello idrometrico del fiume durante il rilievo sono state considerate in modo analogo all'"effetto di marea" che si ha nei rilievi in mare; ciò ha consentito di trattare i dati rilevati in modo omogeneo, anche se acquisiti in tempi molto differenti.

Alla fine del rilievo sono stati ricavati dei "blocchi" omogenei, nei quali tutti i valori di profondità erano riferiti allo zero idrometrico dell'idrometro della rete CAE di riferimento più vicino.

Per poter associare la quota assoluta a ciascun punto, si è tenuto conto della reale pendenza del pelo libero dell'acqua, determinata sulla base di misure GPS cinematico relativo con ricevitori L1/L2 e lettura simultanea ad gli idrometri. La pendenza è stata calcolata con due distinti metodi ed in due distinte occasioni in base alle caratteristiche di navigabilità proprie del fiume, realizzando così un profilo continuo del fiume con un punto mediamente ogni 10-15 metri.

Nell'integrare i due rilievi, si è dovuto tener conto delle zone di sovrapposizione (molto rare) createsi laddove il laser ha rilevato tratti di fiume che in seguito, al momento del passaggio dell'imbarcazione sono risultati sommersi e dunque misurabili anche dal rilievo batimetrico nonché delle lacune (presenti in percentuale molto maggiore) laddove la profondità dell'acqua è stata sufficiente ad assorbire l'impulso laser ma non a consentire il rilievo batimetrico. **INSERIRE DATI**

SU AREA TOTALE E % RILEVATA

Nel primo caso si è ritenuto più affidabile, per le condizioni in cui sono state svolte le misure e per le caratteristiche dei due sistemi, il rilievo laser rispetto al rilievo batimetrico; infatti le zone di sovrapposizione hanno in genere bassissima profondità, per cui il sensore batimetrico ha lavorato con angoli vicini ai valori estremi (180°), in corrispondenza dei quali le precisioni sono inferiori.

Nel caso di assenza dei dati dei due rilievi si è proceduto, d'accordo con la Direzione Lavori, ad effettuare una interpolazione lineare tra i dati mancanti per completare la copertura; anche in questo caso l'errore commesso è molto basso, in quanto in pratica queste aree corrispondono principalmente a zone in cui il terreno degrada dalla sponda verso il centro del fiume in modo pressoché lineare.

2.4.3 Integrazione del fondale mediante l'interpolazione di sezioni AIPO

Da una accurata analisi finale del rilievo condotta di comune accordo con la Direzione lavori, sono state evidenziate alcune aree nelle quali non è stato possibile condurre il rilievo batimetrico per la scarsità di portata del fiume e la scarsa profondità dei fondali.

In queste aree, particolarmente significative per la modellazione idraulica del fiume, sono disponibili le sezioni eseguite per conto di AIPO con metodiche tradizionali. Pertanto è stato deciso di raccordare, per interpolazione, le differenti sezioni eseguite per AIPO con la batimetria disponibile. Per effettuare le interpolazioni in modo più realistico, sono stati creati dei profili intermedi congruenti con l'andamento delle sezioni rese disponibili, che fungessero da Breaklines (intese come linee di passaggio obbligato del modello).

Le parti di batimetria ottenute per interpolazione sono evidenziabili per differenza tra le aree in cui è presente il dato batimetrico ed il limite del pelo acqua del rilievo laser per il terreno emerso.

La figura seguente mostra due esempi dei modelli ottenuti grazie a questo metodo. **DESCRIVERE DI Più cosa significano i colori;**

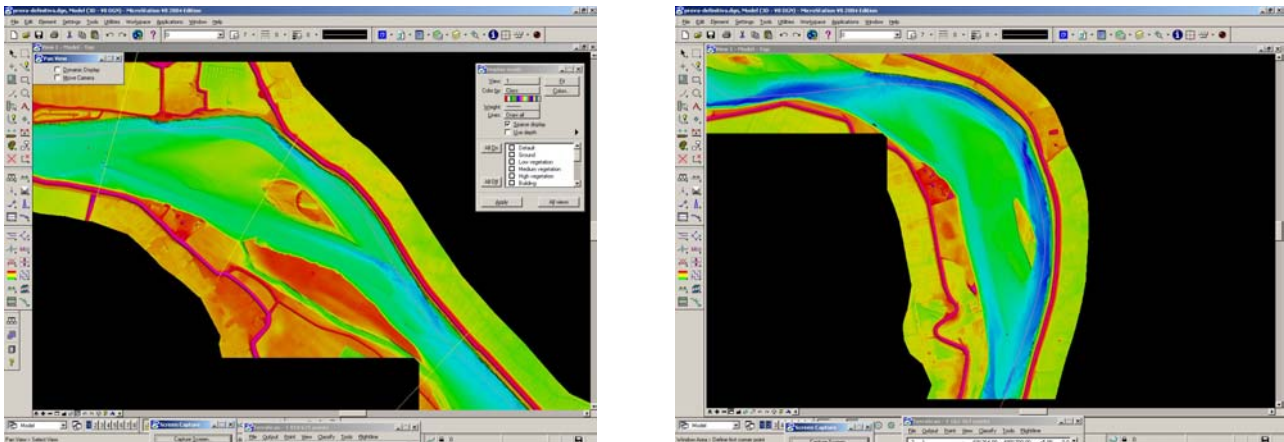


Figura 1 - Esempi di modelli digitali del terreno e della batimetria

2.5 Breaklines

Sono state ricavate “Snappando” direttamente i vertici della breakline sui punti laser privilegiando l'informazione originale del laser in termini di accuratezza e posizionamento del punto misurato a scapito della precisa definizione dei punti di passaggio della breaklines nei punti di effettiva variazione di pendenza o di presenza delle discontinuità (in generale i punti laser acquisiti non corrispondono mai esattamente ai punti di discontinuità). Una possibile alternativa a questa metodica potrebbe essere quella di descrivere planimetricamente le breaklines sulla base del rilievo fotogrammetrico, lasciando al software di attribuire ad ogni punto digitalizzato un valore di quota ottenuto per interpolazione dei valori di quota dei punti originali del laser più vicini.

3. Verifiche e risultati

Per le verifiche del DTM si sono rilevati punti in zone aperte e piane, proiettandoli sul TIN generato dalla griglia di consegna a passo 2 m del DTM idraulico; è stato impiegato prevalentemente ed

estensivamente il GPS cinematico su autovettura o a piedi, sia rispetto a stazioni fisse sia rispetto alla rete di stazioni permanenti della regione Lombardia.

I rilievi cinematici con GPS a bordo di autovettura hanno interessato sia strade asfaltate sia strade poderali, per un totale di oltre 180 km, percorsi per oltre il 50% in andata ritorno e distribuiti lungo l'asta di Po. Circa il 30% dei punti è stato scartato sia perché l'elaborazione dati non è riuscita a fissare le ambiguità sia perché, anche ad ambiguità fissate, quando si è proceduto al controllo dei percorsi in andata/ritorno sono emerse discrepanze evidenti in altimetria o in planimetria. Le discrepanze sono riportate in tabella 2.

Per quanto riguarda il rilievo laser, il valore quadratico medio degli scostamenti tra GPS cinematico e quote del DTM è risultato, su circa 25000 punti controllati in un ambito di oltre 150 km, di 13 cm; non sono state messe in evidenza differenze sistematiche locali. Altri controlli sono stati effettuati con collimazioni di restituitisti su un campione più limitato di punti, distribuiti su 6 tavole.

Sorgente dei dati del DTM verificato	Sorgente dati e metodo di verifica	n. pti o lunghezza controllata (km)	Media (cm)	RMS (cm)
Optech ALTM33	GPS cinematico proiettato su DTM	110 km	2	14
Toposys Falcon II	GPS cinematico proiettato su DTM	56 km	5	10
Fotogr. correlaz. imm.	GPS cinematico proiettato su DTM	5.5 km	18	27
Laser (entrambi)	GPS + teodolite proiettato su DTM	359 pti, 20 tavole	- 4	15
Laser (entrambi)	Restituzione fotogr. manuale	300 pti, 6 tavole	22	27

Tabella 2 – Risultati delle discrepanze tra DTM e rilievi di verifica

State poi controllate le breaklines e la georeferenziazione delle ortofoto sia fotogrammetricamente sia con GPS cinematico. La precisione planimetrica delle breaklines derivate dalla nuvola di punti laser (tipicamente nella modellazione del rilevato arginale) è tra 1.5 e 2.5 metri in media.

Per quanto riguarda invece il DTM nella zona priva di copertura GPS, le verifiche sono state come accennato altrove più difficoltose e limitate (meno di 5 km, in tre zone diverse). I risultati sembrano lievemente peggiori, con un errore quadratico medio di 20 cm in due tratti e di 35 presso Coltaro. In particolare la media è significativa (15 cm in due tratti, quasi 30 cm a Coltaro) ed ha segno costante nei tre tratti (la fotogrammetria è più "alta" del GPS). Una verifica ulteriore (su due gruppi di 11 e 17 punti) è stata fatta con la restituzione stereo manuale: le differenze sono risultate di 38 cm in media con sqm di 9 cm nel primo e di 23 cm e 10 cm nel secondo.

Conclusioni

Analogamente a quanto riscontrato nel progetto del 2004, si conferma l'elevata precisione e produttività del laser a scansione, accoppiato a ortofoto ad alta risoluzione, per lo studio morfologico del territorio; la restituzione fotogrammetrica per correlazione, limitata alle zone aperte, fornisce comunque buoni risultati. In presenza di vegetazione o edificato resta la necessità per entrambe le tecniche di un editing o della restituzione manuale dei dati, che rende la fotogrammetria comparativamente più costosa.

L'esperienza nella determinazione della batimetria indica l'opportunità di impiegare strumentazione IMU/GPS del medesimo livello di quella a bordo dell'aereo di ripresa, per evitare la complessità delle operazioni di raccordo tra gli idrometri e l'assunzione di ipotesi sul profilo del pelo libero.

Si sottolinea come il monitoraggio estensivo dell'intera asta fluviale dovrebbe essere realizzato attraverso campagne a cadenza quinquennale o in relazione agli eventi di piena più significativi, consentendo un consolidamento delle conoscenze acquisite e un progressivo miglioramento delle valutazioni idrauliche, morfologiche e di trasporto solido effettuate dall'Autorità di bacino del fiume Po.

Bibliografia

G. Banchini, A. Cavazzini, A. Colombo, F. Filippi, G. Lombardo, A. Manzino, F. Rinaudo, 2004. Il nuovo DTM dell'Autorità di bacino del fiume Po. VIII Conferenza Nazionale Asita, Roma.