

# **La ricostruzione delle scale di deflusso e delle serie idrologiche di livello - portata**

## **1. Generalità e posizione del problema**

La ricostruzione delle scale di deflusso in alcune sezioni di interesse nasce principalmente dalla necessità di ottenere una stima attendibile dei deflussi *reali* in uscita dai bacini idrografici di interesse (serie idrologiche di livello-portata), componente essenziale, ad esempio, per la definizione del bilancio idrologico.

La conoscenza preliminare necessaria comprende innanzitutto il calcolo delle aree drenate (bacini idrografici) e della natura e uso dei suoli, la disponibilità di serie storiche recenti di misure pluviometriche e di livello idrometrico a passo adeguato (orario o semiorario), l'individuazione della geometria e scabrezza dell'alveo in esame e soprattutto le misure dirette di livello-portata, realizzate, nel caso dei Bacini Regionali Romagnoli, dai tecnici preposti alla gestione della rete teleidrometrica di misura. Di grand'utilità è poi la valutazione degli zeri realmente letti dagli idrometri, in genere posizionati in corrispondenza degli impalcati di ponti stradali (Figura 1), attraverso ad esempio misure freaticometriche dirette.



**Figura 1- Esempio di teleidrometro posizionato sull'impalcato di un ponte, Montone a Ponte Braldo**

A partire da questa base dati è possibile individuare almeno due scale di primo tentativo (scala di moto permanente e scala osservata) per almeno due sezioni di uno stesso corso d'acqua; all'interno del *range* di scale di deflusso che si va così delineando è in genere possibile operare la scelta più opportuna, vincolando tale scelta a produrre delle serie idrologiche di portata congruenti tra le sezioni di monte e valle. E' opportuno in questa fase verificare la coerenza, sia sull'intera serie idrologica ricostruita (esaminando le medie mensili e annuali) che nel singolo evento di piena, tra i volumi defluiti e quelli piovuti sul bacino, ricostruibili a partire dalle misure pluviometriche, avendo cura di ottenere valori dei coefficienti di deflusso comparabili con quelli comunemente reperibili in letteratura e coerenti con la natura dei suoli ed il tipo di copertura del bacino drenato. La coerenza tra le scale ricostruite in due sezioni successive di uno stesso corso d'acqua può essere infine testata verificando, per alcuni eventi di piena significativi, l'entità delle laminazioni prodotte, propagando con un calcolo in moto vario la piena dalla sezione di monte e confrontando l'idrogramma di valle con quello ricostruito per il medesimo evento a partire dalla scale di deflusso locale.

La scelta finale della *best available solution* in termini di scala di deflusso rappresenta un affinamento per iterazioni successive della scelta di primo tentativo in modo da soddisfare accettabilmente le verifiche sopra elencate. Le procedure appena descritte e di seguito dettagliate sono state applicate nel corso di studi recenti (Mazzoli, 2003 e 2004) alla ricostruzione delle serie idrologiche di livello-portata in alcune sezioni dei Bacini Regionali Romagnoli per il periodo 1995-2002, cui ci si riferirà nel seguito anche solo come *Serie idrologiche 1995-2002*.

## 2. Reperimento e formattazione dei dati di partenza

La disponibilità dei dati pluviometrici e teleidrometrici è alla base della metodologia sopra esposta per la ricostruzione delle scale di deflusso.

I dati pluviometrici in particolare sono di norma reperibili, anche attraverso più reti di misura ed in maniera abbastanza ben distribuita sul bacino, a passo orario (comunemente utilizzato per un'analisi alla scala del singolo evento di piena). A titolo di esempio in Figura 2 è riportata la rete pluviometrica dell'Ex-Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (ora gestita da ARPA-SMR) nell'area di interesse per il bacino montano e collinare del fiume Ronco. La definizione dell'estensione del bacino è operabile sulla base ad esempio della disponibilità di un modello digitale del terreno (DEM), che permette un'agevole individuazione, tramite software GIS, delle aree drenate; oppure attraverso l'esame della cartografia CTR a scala adeguata. Nel caso dei Bacini Regionali Romagnoli è disponibile il modello digitale del terreno a passo 10 m sulla base delle cartografie CTR 1:5000 per le zone fuori alveo e dei rilievi di sezione ogni 200 m circa di progressiva fluviale per l'alveo stesso.

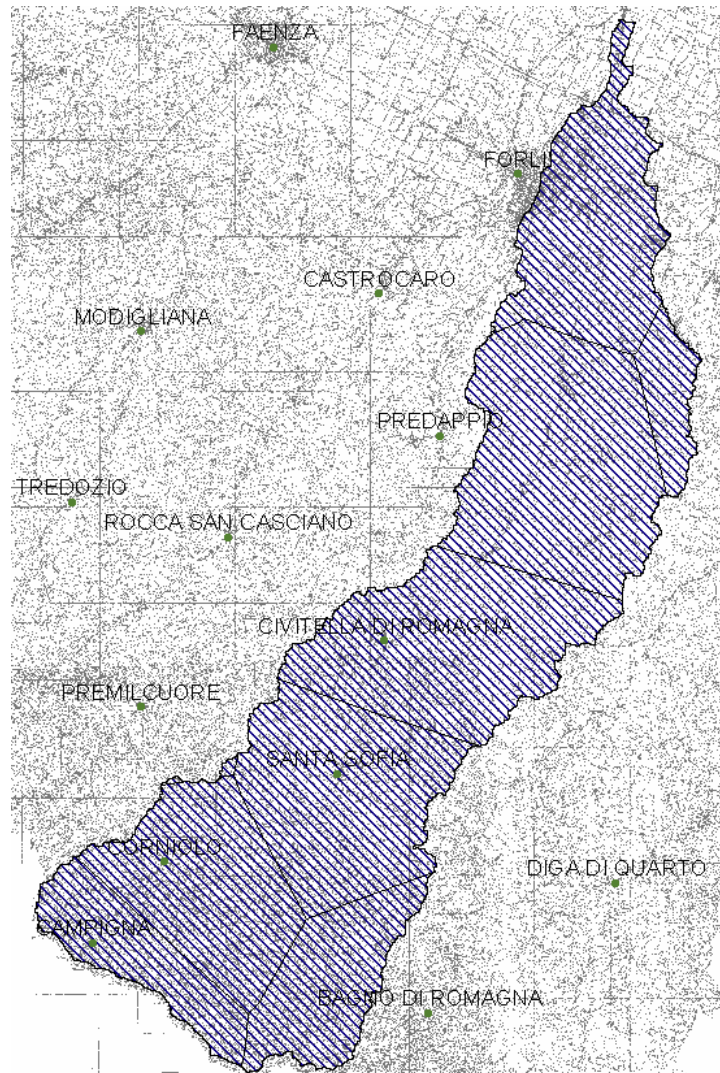
Per passare dal valore orario puntuale di pioggia al valore medio areale si può utilizzare il noto metodo dei topoi o poligoni di Thiessen (tracciati in Figura 2 per il bacino dell'esempio). Per ogni istante di tempo  $t$  il valore areale della pioggia  $h(t)$  risulta cioè dato da:

$$h(t) = \frac{\sum_{i=1}^n h_i(t) \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

Con  $i$  generica stazione pluviometrica,  $n$  numero totale di stazioni interessate e  $P$  peso da attribuire a ciascuna stazione, dato da:

$$P_i = \frac{A_i}{A_{tot}} \quad (2)$$

Dove  $A_i$  è l'area del singolo poligono su cui insiste la stazione e  $A_{tot}$  è l'area totale del bacino.



**Figura 2- stazioni pluviometriche ex-SIMN e poligoni di Thiessen relativi, bacino del Ronco a Cocolia**

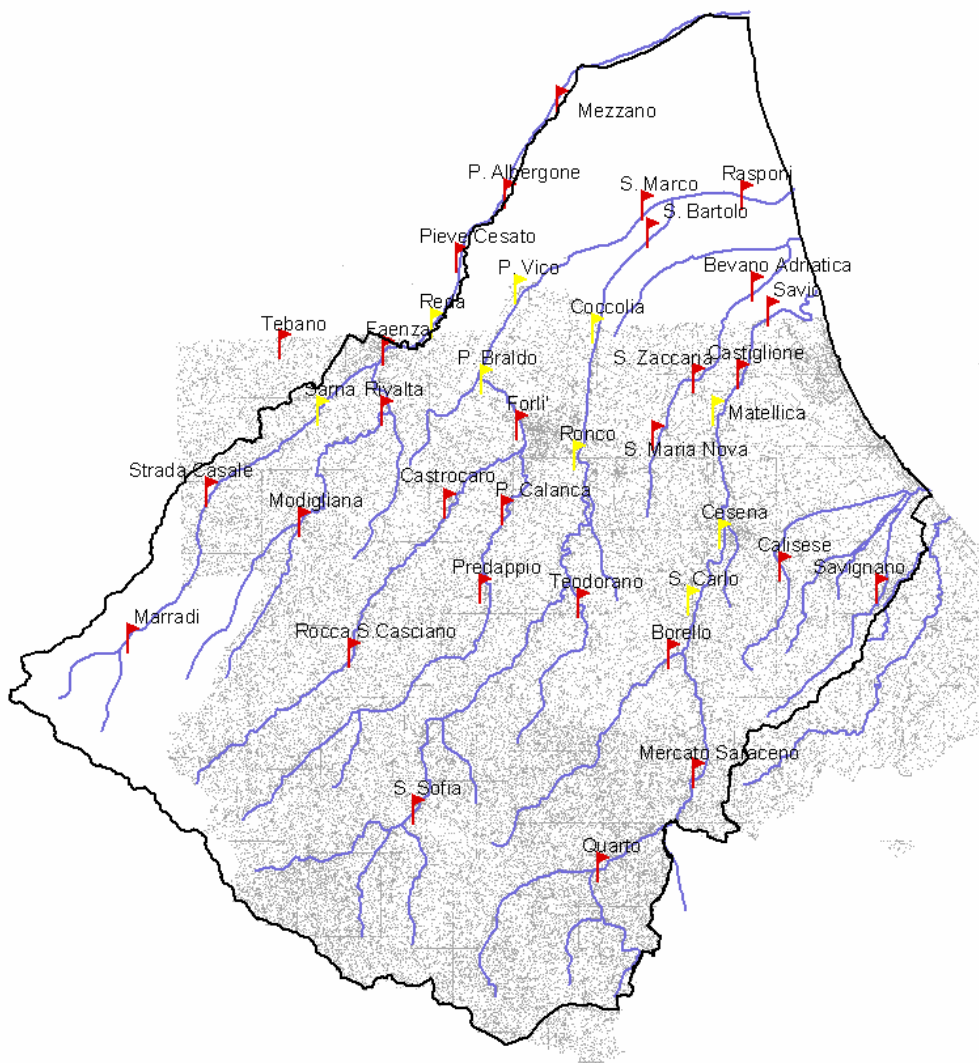
L'applicazione del metodo dei topoieti permette anche di considerare un criterio speditivo per la sostituzione di eventuali dati mancanti in una o più stazioni. In tal caso infatti al posto del generico valore mancante  $h_i$  viene inserito il valore medio delle misure puntali nelle restanti stazioni, il che equivale in pratica secondo la (1) e la (2) a ripartire in parti uguali l'area  $A_i$  e quindi il peso  $P_i$  corrispondente alla stazione mancante tra quelle restanti.

I dati pluviometrici, in assenza di validazione da parte dell'ente che li fornisce, vanno preventivamente esaminati per ciascuna stazione e filtrati per eliminare quantomeno le misure palesemente errate (valori negativi o esageratamente elevati).

Per quel che riguarda i dati orari di livello idrometrico la disponibilità di un'adeguata rete teleidrometrica in almeno due sezioni di un corso d'acqua, fornisce la base di partenza per una ricostruzione delle scale di deflusso e dei regimi di portata attendibile e di cui sia possibile verificare la congruenza lungo l'alveo. A titolo di esempio si riporta in Figura 3 il sottoinsieme di stazioni teleidrometriche sul territorio dei Bacini Regionali Romagnoli per cui sono state ricostruite le *Serie idrologiche 1995-2002*, rispetto al totale di stazioni monitorate presso il Servizio Tecnico di Bacino Fiumi Romagnoli di Ravenna.

Prima di procedere con le analisi sulle serie di livello per ciascuna stazione è utile effettuare un sopralluogo allo scopo di definire lo zero strumentale, ad esempio attraverso una misura diretta con freatimetro ad orario noto, valutando la quota del pelo libero rispetto al rilievo topografico trasversale della sezione e confrontando l'altezza sul fondo così ricavata con il dato rilevato dal teleidrometro nello stesso momento.

Nella tabella successiva sono riassunti ad esempio i risultati dell'indagine diretta sugli zeri idrometrici per la ricostruzione delle *Serie idrologiche 1995-2002*, per alcune sezioni sul fiume Lamone, evidenziando le discrepanze con i valori ottenibili da aste idrometriche locali e le note sull'eventuale difficoltà o impossibilità ad ottenere una valutazione attendibile dello zero con gli strumenti utilizzati. Si sono considerate in questo caso accettabili discrepanze contenute entro 10 cm, visto il tipo di strumento utilizzato, ovvero un freatimetro a corda, calato manualmente dall'operatore a partire da un punto a quota nota sull'impalcato del ponte che ospita il teleidrometro.

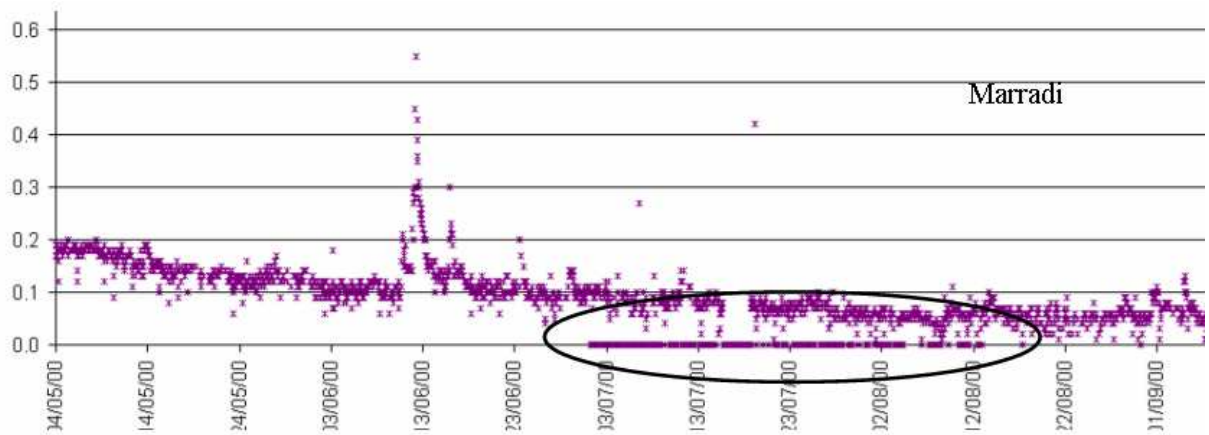


**Figura 3- Stazioni teleidrometriche indagate per la ricostruzione delle *Serie idrologiche 1995-2002***

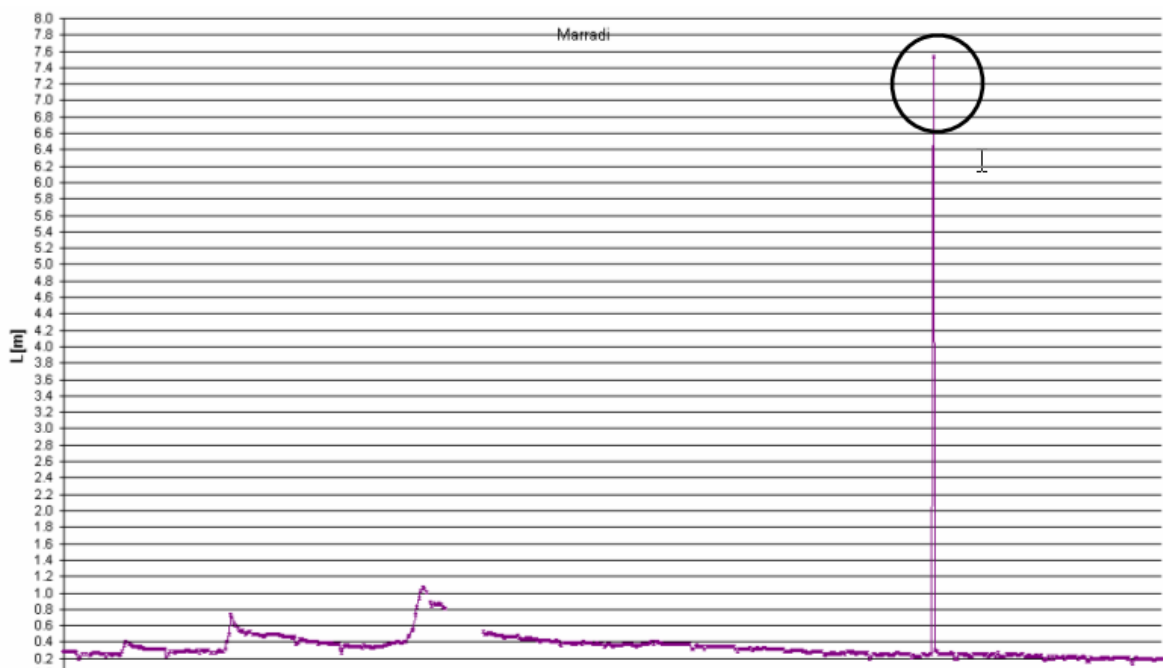
Fiume e sezione	livello	livello m	NOTE
	strumento m		
Lamone Reda	1.14	1.11(1)	/
Lamone Strada Casale	0.21	1.51(1)	lettura con freatimetro da estradosso ponte = 5.5 m , sulla base della sezione rilevata il livello corrisponderebbe a 1.51 m sul fondo, contro 0.21 m da strumento: lo strumento è probabilmente tarato sulla briglia a valle, allo stato attuale lo zero non è identificabile
Lamone Marradi	0.19	0.15(2)	/
Marzeno Modigliana	0.17	0.15(2)	/
Marzeno Rivalta	0.75	0.63(1)	le sezioni rilevate disponibili risalgono al 1998 , si evidenzia una sovrastima dello zero strumentale di circa 10-12cm

**Tabella 1 Zerì idrometrici: risultato dei sopralluoghi effettuati i livelli (1) sono misurati mentre (2) sono rilevati da asta idrometrica locale, fiume Lamone**

A valle della determinazione dello zero idrometrico le serie storiche di livello vanno quindi esaminate e ripulite dai valori negativi o nulli incongrui con il resto della serie (Figura 4) e da valori di tipo *spot* frutto di errori strumentali o nel database di partenza (Figura 5).



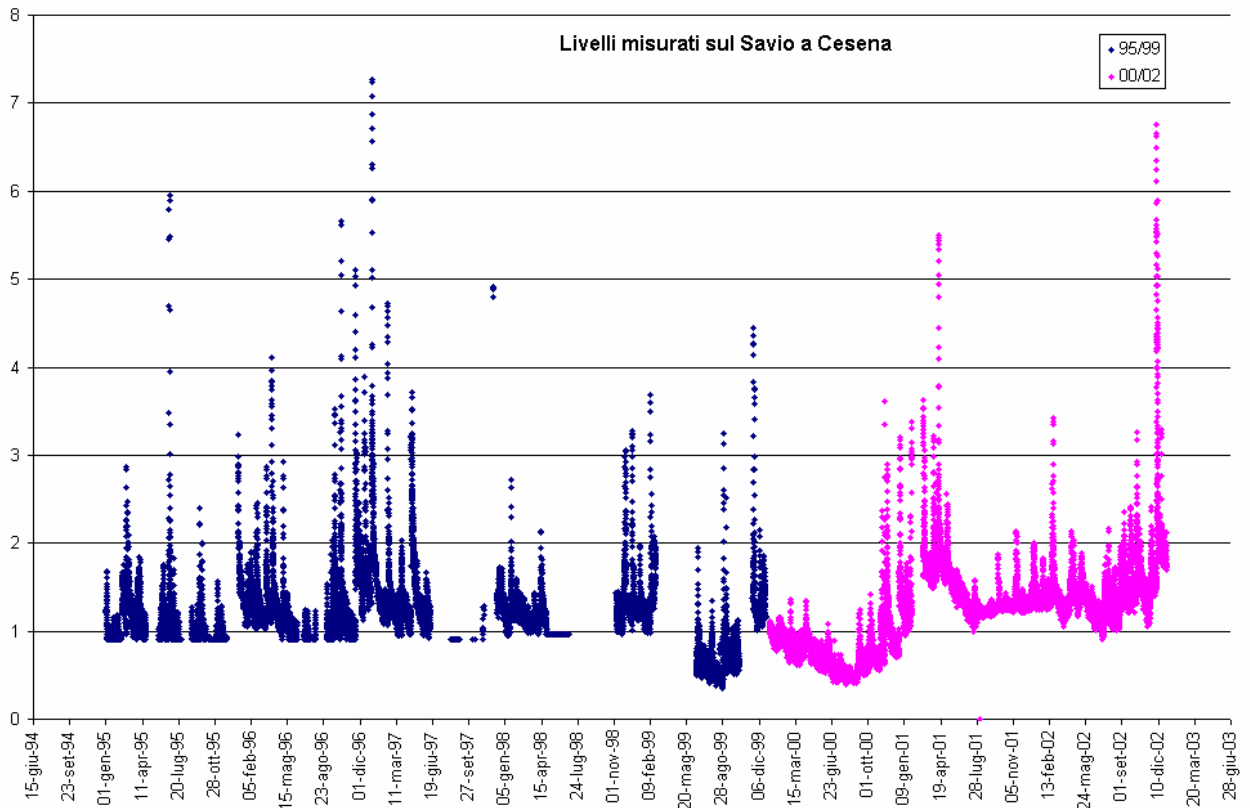
**Figura 4- esempio di ripulitura delle serie da valori incongrui di tipo nullo o negativo**



**Figura 5- esempio di ripulitura delle serie da valori incongrui di tipo *spot***

Delle serie così ripulite può essere necessario operare il riallineamento nel tempo aggiustando lo zero idrometrico all'interno del periodo in esame, in modo da mantenere la coerenza interna, evidenziabile in particolare esaminando la posizione dei livelli nei periodi di magra di annate successive. In Figura 6 ad esempio è riportato il caso della sezione di Cesena

sul Savio dove è evidente la necessità di riallineare i livelli antecedenti e successivi il maggio '99.



**Figura 6- Discontinuità nell'andamento dei livelli misurati sul Savio a Cesena**

### 3. Individuazione delle scale di partenza

La principale scala di riferimento per la ricostruzione dei deflussi a partire dai livelli è la scala di moto permanente. Base di partenza è la disponibilità di un modello geometrico adeguato dell'alveo in un tratto sufficientemente lungo (alcuni km indicativamente) attorno alle sezioni di interesse. Contestualmente, sulla base ad esempio del tipo di copertura dell'alveo, è necessario fornire una stima della scabrezza superficiale. Tali dati minimi possono essere poi inseriti all'interno di un modello di calcolo in moto permanente per la ricostruzione della scala di portate relativa.

Le aste fluviali di competenza dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli (di seguito semplicemente AdB) sono state oggetto di una campagna recente (2003) di rilievo delle sezioni fluviali, a partire dalle quali è stato prodotto direttamente in ambiente HEC-RAS

(USACE,2002) il modello geometrico dei corsi d'acqua, con contestuale valutazione delle scabrezze lungo l'alveo.

Per effettuare la ricostruzione in moto permanente dei livelli corrispondenti ad un particolare valore di portata vanno innanzitutto individuate idonee condizioni la contorno, ad esempio il livello del medio mare alla foce e un'altezza pari a quella di moto uniforme a monte (quest'ultima condizione è chiaramente convenzionale provocando un errore nell'eventuale ricostruzione di profili di corrente veloce in prossimità della sezione di monte, che tuttavia ha in genere scarso interesse collocando delle sezioni allo studio a diversi chilometri dagli estremi di monte e valle delle aste disponibili).

La ricostruzione dei profili, in condizioni di moto permanente unidimensionale, si basa sulla soluzione dell'equazione dell'energia tra due sezioni consecutive del corso d'acqua (Figura 7) con procedura iterativa di tipo standard step. L'equazione dell'energia si presenta nella forma (USACE, 2002):

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (3)$$

con  $Y$  = quota del pelo libero sul fondo [m]

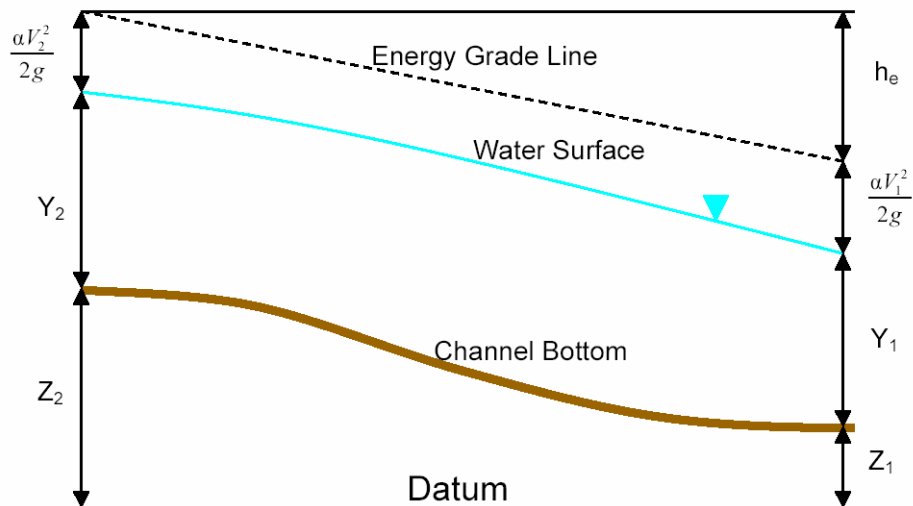
$Z$  = quota del fondo sull'orizzonte di riferimento [m]

$V$  = velocità media della corrente [m/s]

$\alpha$  = coefficienti di peso delle velocità

$h_e$  = perdita di energia totale [m]

dove  $\alpha$  ed  $h_e$  dipendono sostanzialmente dalla geometria e scabrezza delle sezioni e dalle portate transitive (si rimanda al manuale di riferimento USACE 2002 per ogni approfondimento). I valori di scabrezza utilizzati per i Bacini Regionali Romagnoli sono quelli che accompagnano le geometrie fornite dall'AdB (sono forniti in questo caso due distinti scenari a scabrezza crescente: *alveo pulito* e *alveo attuale*) che risultano coerenti con le evidenze emerse dai sopralluoghi, oscillando indicativamente tra valori  $n$  di Manning [ $s/m^{1/3}$ ] di 0.03 e 0.1 con i valori inferiori solitamente adottati per il letto dell'alveo e quelli superiori per le pareti dell'alveo inciso ed i piani golenali.



**Figura 7- schema di ricostruzione dei profili con metodo standard step ( HEC-2002)**

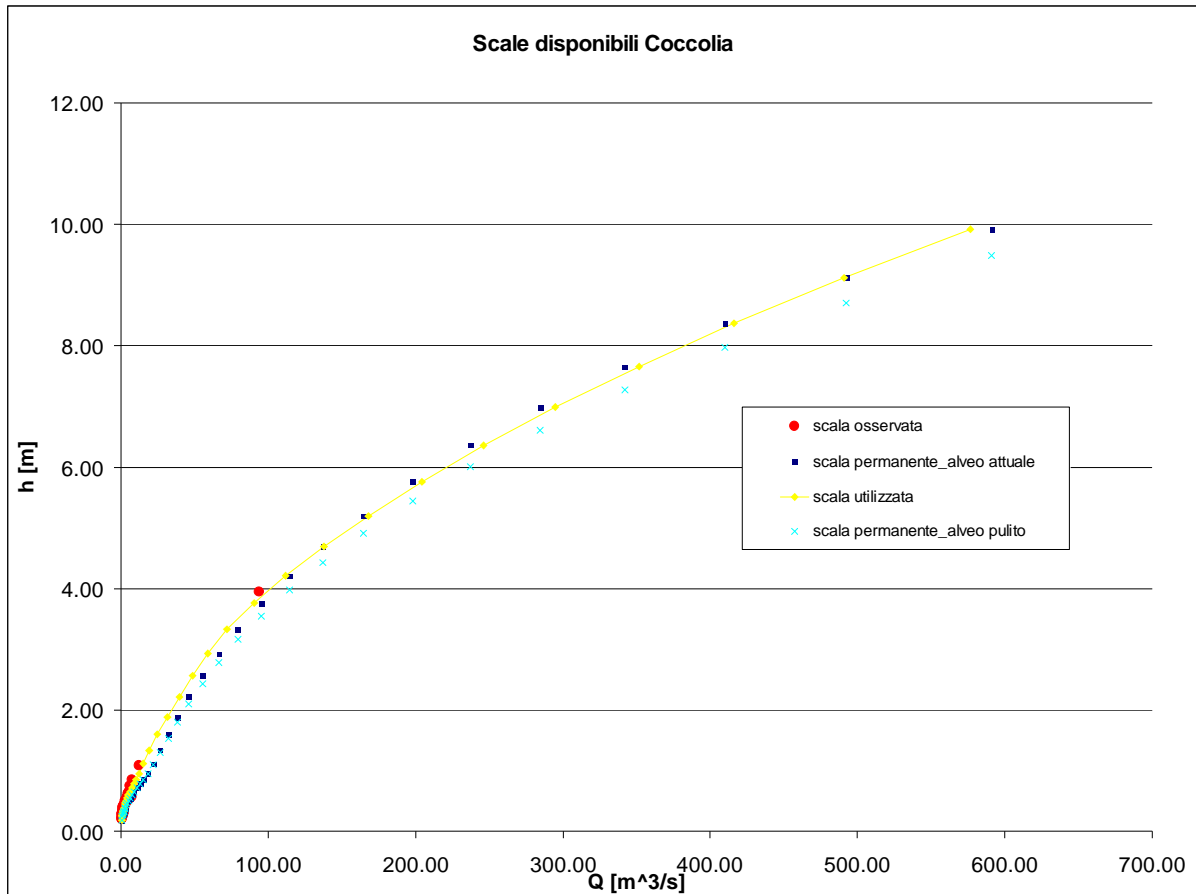
Lanciando una serie di ricostruzioni a valori crescenti di portata  $Q$  si ottiene per punti la scala di deflusso di moto permanente. La relazione tra tirante  $h$  [m] e portata  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] viene poi interpolata secondo la ben nota:

$$Q = \alpha \cdot (h)^\beta \quad (4)$$

Con  $\alpha$  e  $\beta$  parametri della scala di deflusso.

La presenza di sezioni composte (alveo inciso e di golena), caratterizzate spesso da valori sensibilmente diversi di scabrezza, piuttosto che la differenza nel comportamento idraulico in corrispondenza di singolarità quali i salti di fondo (funzionamento a stramazzo per portate basse, effetti di rigurgito in piena), comporta la necessità di definire la (4) come spezzata, individuando ad esempio una scala in magra ed una in piena. In Figura 8 è riportato ad esempio l'andamento della scala permanente ricostruita per il fiume Ronco a Coccolia (alla chiusura del bacino in Figura 2). In questo caso si notano tre distinti andamenti della curva, per portate inferiori a circa  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , superiori a circa  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  e nel range intermedio, descritti da tre diverse scale di deflusso.

Nello stesso grafico è riportato l'andamento delle misure storiche disponibili, che costituiscono il secondo riferimento, quando disponibile, per le scale di partenza, nonché la curva finale scelta come *best available solution*. Nel caso esaminato la maggior parte delle misure dirette è riferita alle portate di magra, con rare escursioni su valori dell'ordine dei  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 8- Esempio di scala permanente in condizioni di alveo pulito e attuale, scala osservata e scelta finale per il Ronco a Cocolia**

Il problema della mancanza di riferimenti misurati in piena, rende viepiù incerta la determinazione delle scale nei range elevati di portata, lasciando come unico riferimento il valore di moto permanente e rendendo a maggior ragione necessarie successive verifiche di congruenza degli idrogrammi ricostruiti per testare l'affidabilità delle scale scelte. La consistenza delle misure storiche di portata per i principali bacini del territorio dell'Adb (periodo 1995-2002) è riportata in Tabella 2.

Una scelta di primo tentativo della scala di deflusso può essere operata in questa fase appoggiandosi alla scala osservata per le magre, quando sia disponibile un buon numero di misure (è il caso ad esempio di Cocolia sul Ronco o Matellica sul Savio) e posizionandosi su un valore intermedio tra questa e la scala di moto permanente per le portate più elevate.

	<i>Numero di misure di Portata-livello</i>	<i>Numero di misure di Portata</i>	<b>Qmin</b> Misurata [m <sup>3</sup> /s]	<b>Qmax</b> Misurata [m <sup>3</sup> /s]

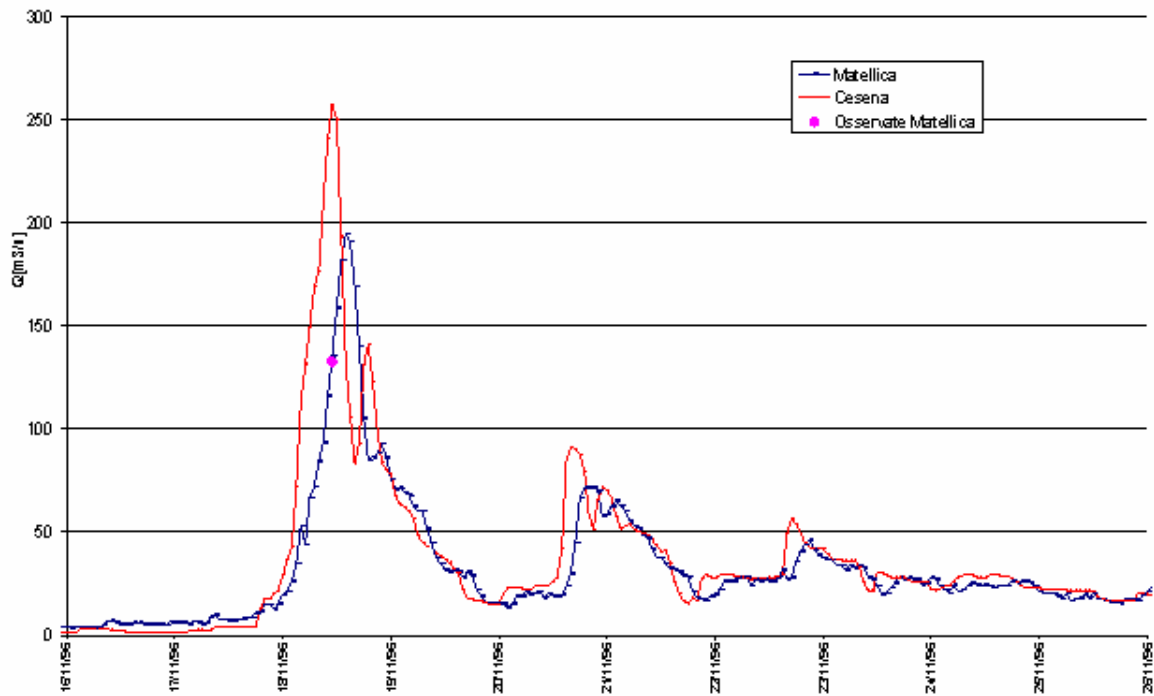
S.Carlo	33	35	0.16	32
Cesena	-	38	0.2	31.3
Matellica	72	72	0.37	144.5
Ronco	-	25	0.19	79.4
Coccolia	59	68	0.61	93.85
P.Braldo	7	18	0.68	16
P.Vico	42	65	0.14	65
Sarna	-	44	0.15	48.26
Reda	60	62	0.25	154.16

**Tabella 2 –misure storiche disponibili per i bacini del territorio dell’Adb, periodo 1995-2002.**

#### **4. Verifiche di congruenza sulle serie ricostruite**

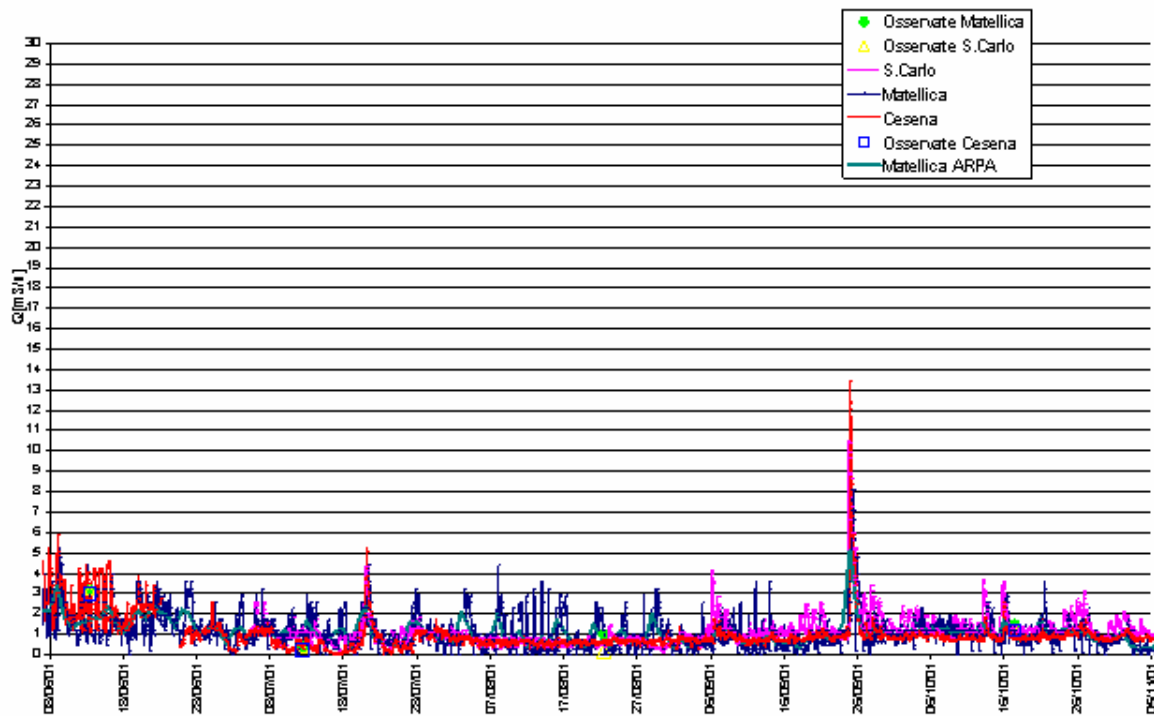
L’affinamento della scala di primo tentativo, scelta secondo le indicazioni fornite nei punti precedenti, può essere conseguito attraverso l’analisi della congruenza tra i deflussi ricostruiti in due sezioni di monte e valle di uno stesso corso d’acqua. La congruenza deve essere rispettata sia nel corso degli eventi di piena, dove, a meno di significativi aumenti del bacino contribuente, ci si attende un effetto di laminazione del picco di piena e un sostanziale allineamento dei volumi defluiti nel corso dell’evento, sia nelle magre osservate, in cui, a meno di apporti/prelievi da fonti extra bacino (immissioni e prelievi agricoli, scarichi di depuratori ecc..), i valori ricostruiti a monte e valle dovrebbero essere sostanzialmente allineati, con differenze imputabili all’estensione, tipo di copertura o uso dei suoli dei bacini sottesi o a possibili scambi tra il corso d’acqua e le falde acquifere.

L’immagine seguente mostra ad esempio l’idrogramma di piena ricostruito nel novembre 1996 sul Savio, dove si apprezza l’effetto di laminazione dell’onda nel passaggio da Cesena a Matellica e l’andamento delle magre ricostruite per lo stesso corso d’acqua nel 2001.



**Figura 9- evento di piena novembre 1996, fiume Savio**

In Figura 10 è invece rappresentato l'andamento delle magre 2001 sempre per il fiume Savio.



**Figura 10- andamento delle magre 2001, fiume Savio**

Nella scelta della *best available solution*, disponendo come per il caso dei Bacini Regionali Romagnoli di un buon numero di portate misurate specie in magra (Tabella 2), si può adottare il criterio del miglior adattamento possibile agli andamenti di portata misurati, pur con le inevitabili incertezze legate ad esempio alla non disponibilità dell'orario esatto delle misure di portata-livello, che rende difficoltosa la comparazione con il valore ricostruito a partire dal livello teleidrometrico.

Ulteriore termine di riferimento nella scelta della *best available solution* è costituito dall'analisi dei volumi defluiti a monte e a valle per ogni corso d'acqua durante alcuni eventi di piena significativi, confrontati con i rispettivi afflussi meteorici sull'area.

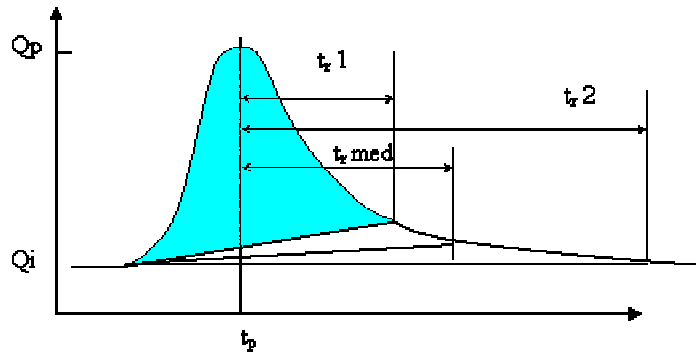
Valutando la pioggia oraria areale, ad esempio con il metodo dei poligoni di Thiessen illustrato nei capitoli precedenti, e moltiplicando tale valore per l'area del bacino si ottiene la stima oraria del volume in ingresso al sistema.

Durante un singolo fenomeno di piena ci si può attendere un deflusso di portata (depurato della parte sotterranea di *baseflow*) in volume compreso tra il 30 ed il 70% circa dell'afflusso meteorico, valori riscontrati nella pratica comune. Per la separazione del *baseflow* si possono utilizzare le metodologie empiriche proposte in letteratura; nel caso delle *Serie idrologiche 1995-2002* si è adottato il valor medio di due metodi di uso comune (Maione, 1995); il primo consiste nell'individuare il punto sulla curva di esaurimento della piena a distanza  $t_{r1}$  [ore] dal picco in base all'area del bacino contribuente  $A$  [km<sup>2</sup>] secondo la relazione :

$$t_r = 0.8 \cdot A^{0.2} \quad (5)$$

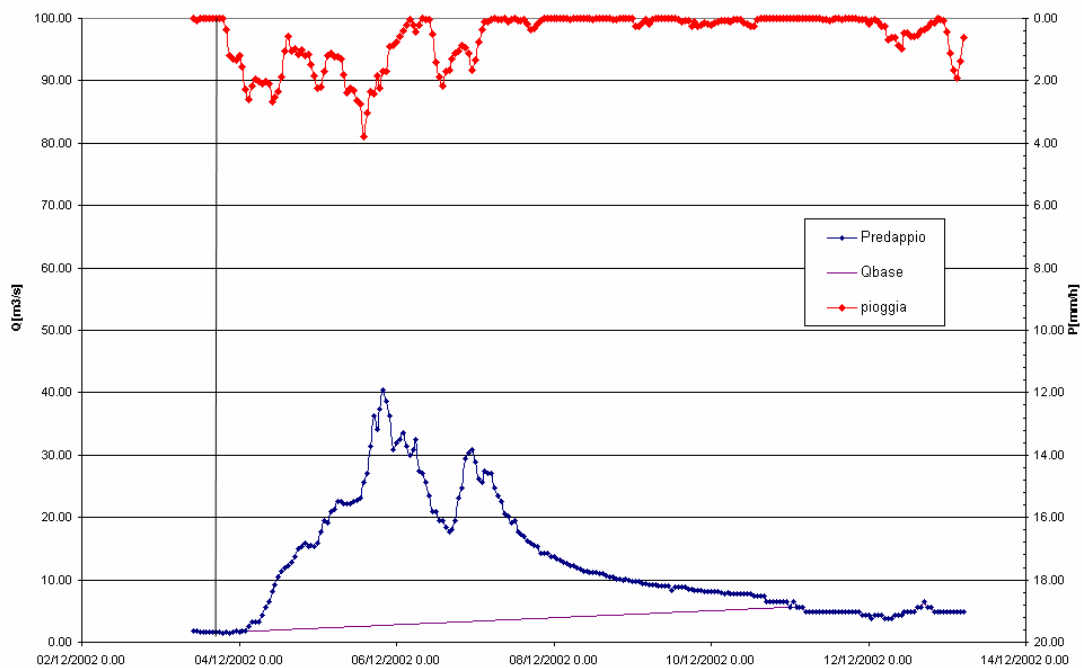
Il secondo calcola il tempo di esaurimento  $t_{r2}$  [ore] tracciando la retta orizzontale a partire dall'istante di inizio della piena (il che ha però lo svantaggio di produrre un tempo  $t_r$  piuttosto lungo)

Attribuendo la porzione inferiore della curva al *baseflow* e il rimanente alla parte più diretta di deflusso legato all'evento meteorico in esame secondo lo schema di Figura 11 si ottiene la separazione dei deflussi.



**Figura 11 separazione del *baseflow* in un evento di piena**

L'analisi dei volumi in ingresso e uscita dal bacino parte da una preventiva individuazione della porzione di ietogramma di pioggia da attribuire alla formazione dell'onda di piena come deflusso diretto. Un criterio possibile è quello di collocare l'inizio del fenomeno piovoso grossomodo all'inizio della piena o comunque entro poche ore prima del suo inizio e la fine a cavallo del picco di piena (si veda ad esempio la Figura 12). E' infatti noto (Maione, '95) come, tranne che per gli eventi pluviometrici distribuiti molto disuniformemente nello spazio nel tempo, il picco si presenta, da evento a evento, con un ritardo rispetto all'inizio del fenomeno abbastanza costante e attorno al tempo di corrivazione del bacino.



**Figura 12- esempio di separazione del *baseflow* e di scelta dell'ietogramma per un evento a Predappio sul Rabbi.**

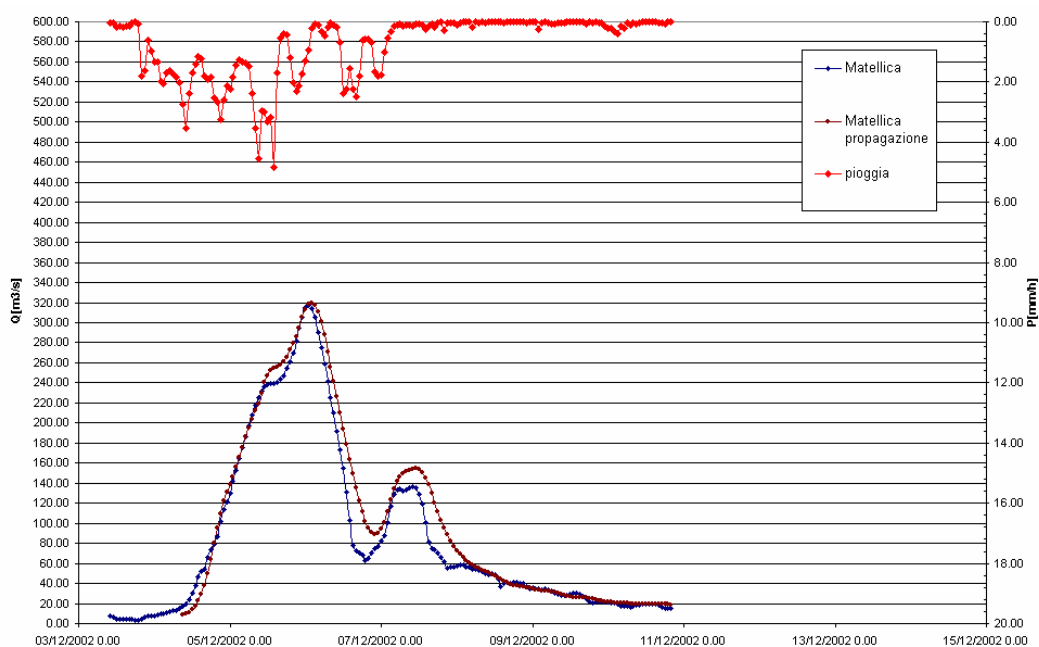
In Tabella 3 si riportano ad esempio i risultati dell'analisi di alcuni eventi di piena per le sezioni di Ronco (SS9) e Coccolia sul Ronco.

EVENTI	$\varphi=V_{out}/v_{in}$	Qmax[mc/s]	$\varphi=V_{out}/v_{in}$	Qmax[mc/s]	ptot[mm]
02/04/1996			0.50	161.1	51.1
15/02/1997			0.44	158.7	50.8
21/11/1999	0.27	218.3	0.32	217.8	58.6
04/03/2001	0.73	143.6	0.61	113.7	25.4
12/04/2001	0.48	198.7	0.43	165.4	58.6
04/12/2002	0.32	194.1	0.32	172.2	128.2
Medio	<b>0.45</b>		<b>0.42</b>		

**Tabella 3- sintesi dei risultati dell'analisi afflussi-deflussi**

Nel caso dei Bacini Regionali Romagnoli l'analisi dei volumi defluiti in piena ha evidenziato una buona congruenza tra i volumi nelle sezioni di monte e valle, con differenze mediamente al disotto del 10-15%.

Sfruttando infine il modello geometrico dell'alveo utilizzato per le ricostruzioni di moto permanente e isolando alcuni eventi di piena significativi, ad esempio quelli utilizzati per l'analisi afflussi-deflussi, si può confrontare l'idrogramma della sezione di valle con quello che si produce come effetto della propagazione in moto vario dell'idrogramma di monte. Rimandando ai manuali di riferimento (USACE, 1997,2002) per ogni dettaglio sulle analisi in moto vario, in questa sede ci si limita a riportare un esempio del confronto proposto per la piena di dicembre 2002 sul Savio tra Cesena e Matellica (Figura 13).



**Figura 13- Confronto tra le onde di piena propagata e ricostruita a Matellica, piena del dicembre 2002**

Si nota in generale un sostanziale allineamento del picco di piena principale con una tendenza alla sottostima dei volumi defluiti nell'onda ricostruita, specie nell'idrogramma secondario, rispetto a quella propagata dell'ordine del 12 % massimo.

#### **4. Scelta finale della *best available solution*, esame delle criticità**

La scelta finale della *best available solution* consiste in una applicazione iterativa delle verifiche di congruenza sopra esposte, affinando progressivamente la scelta dei parametri  $\alpha$  e  $\beta$  della (4) e dello zero idrometrico sino a che non risultino accettabilmente soddisfatte le condizioni richieste riassumibili in sintesi come:

- Rispetto delle portate misurate storicamente in loco e della congruenza dell'intera serie di portate tra monte e valle
- Congruenza tra i volumi affluiti – defluiti per ogni sezione e tra più sezioni lungo lo stesso corso d'acqua per singoli eventi di piena
- Riscontro dei presumibili effetti di laminazione dei picchi tra sezioni di monte e valle per singoli eventi di piena.

Gli spetti critici della procedura appena descritta sono riassumibili principalmente come:

- Disponibilità di un adeguato numero di eventi di piena registrati per le verifiche di congruenza
- Determinazione dello zero idrometrico rispetto ad un rilievo noto di sezione
- Disponibilità di misure dirette di portata-livello nella sezione strumentata sia in magra che in piena (queste ultime di particolare rilievo per *vincolare* la scala di deflusso anche nella parte *alta*)
- Disponibilità di un modello geometrico di moto permanente a scabrezze tarate per la definizione della scala di moto permanente di primo tentativo.

#### **5. Possibili applicazioni delle serie storiche di livello-portata**

La costruzione di serie idrologiche di portata a partire da quelle di livello ha come principale ricaduta la possibilità di caratterizzare in più punti di uno stesso corso d'acqua e monitorare a dettaglio anche orario la componente di deflusso in alveo, confrontando ad

esempio i risultati con quelli ottenibili da modellistica afflussi-deflussi in continuo a partire dalle piogge sul bacino per finalità quali:

- Determinazione delle curve di durata delle portate e valutazioni sui minimi deflussi vitali
- Stesura del bilancio idrologico alla chiusura di sottobacini di interesse

Le elaborazioni preliminari svolte (filtraggio, riallineamento e determinazione dello zero) e le analisi di congruenza sulle serie di portata ottenute rendono poi possibile l'utilizzo delle serie di livello di partenza per scopi ulteriori.

Nel seguito viene in particolare illustrata una procedura di analisi delle serie di livello monte-valle finalizzata alla valutazione dei livelli di allarme e preallarme nel corso di eventi di piena, applicata nel corso di studi recenti (Mazzoli, 2004) ad alcuni corsi d'acqua dei Bacini Regionali Romagnoli nell'ambito della ricostruzione delle *Serie idrologiche 1995-2002*. L'obiettivo principale di un'analisi di questo tipo è fornire, sulla base delle misure esistenti di livello, una prima definizione dei livelli di allarme e preallarme a monte da far corrispondere a condizioni critiche di valle, all'approssimarsi delle quali siano da attivare particolari attività di monitoraggio della piena o di salvaguardia del territorio e della popolazione.

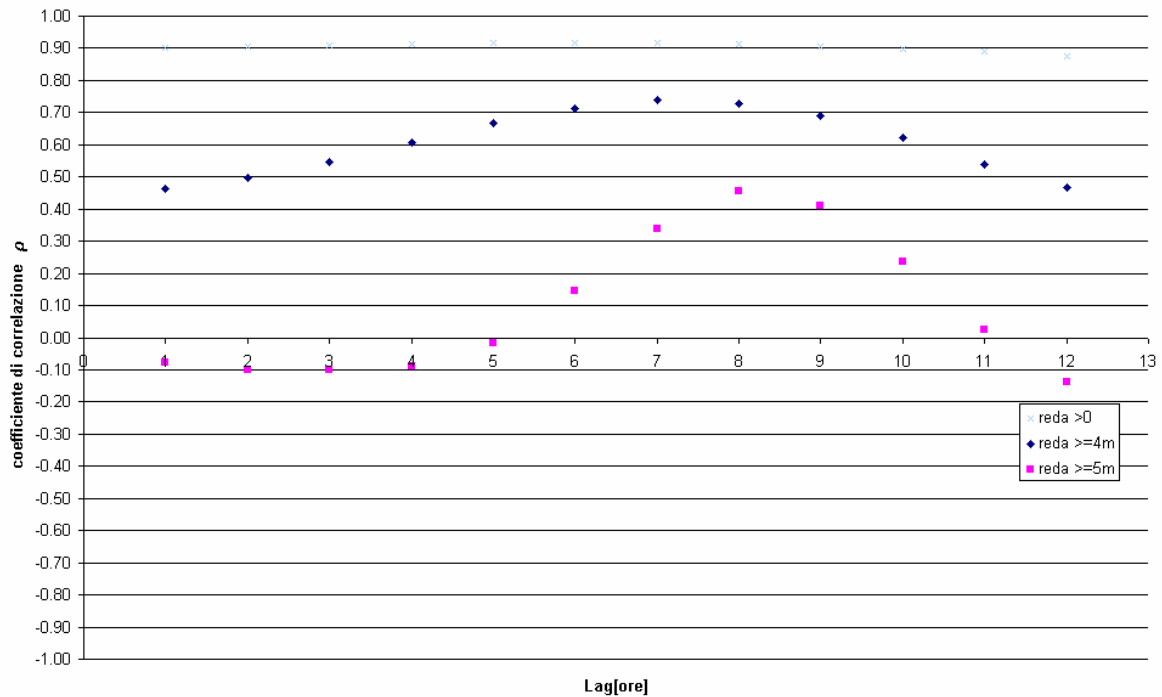
A partire dalle serie di livello in due sezioni di un generico corso d'acqua, serie di valle (X) e corrispondente serie di monte (Y), viene stimato innanzitutto il coefficiente di correlazione  $\rho(X,Y)$  con Y registrata 1, 2, 3 ...sino a F ore prima della corrispondente serie X (F=12-16 ore nel caso delle sezioni esaminate per i Bacini Regionali Romagnoli), secondo la ben nota espressione:

$$\rho(X, Y) = \frac{Cov(X; Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (4)$$

Dove  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $Cov(X,Y)$  sono rispettivamente la varianza e la covarianza delle variabili X e Y. Il valore di  $\rho(X,Y)$  risulta compreso tra 1 e -1; più si avvicina all'unità migliore è la correlazione (crescente o decrescente) tra le variabili X e Y.

La scelta del numero di ore cui estendere l'analisi (F) è iterativa dovendo il range di ritardi da indagare collocarsi a ridosso di quello più plausibile che scaturisce dall'analisi stessa.

Dall'esame del coefficiente di correlazione tra le serie di monte e valle emerge in genere un'utile indicazione sui tempi di transito delle piene, valore di ritardo o *lag* da utilizzare per le successive elaborazioni; nella figura seguente (stazione di Reda e Modigliana sul Lamone) è chiara ad esempio l'indicazione di un tempo di ritardo per le piene significative (livelli di valle superiori a 5 m sul fondo) attorno alle 8 ore. Il risultato è del resto confermato dall'esame puntuale di alcuni eventi di piena, che mostrano ritardi dei picchi di piena tra le due sezioni dell'esempio compresi tra 7 e 9 ore (Tabella 4).

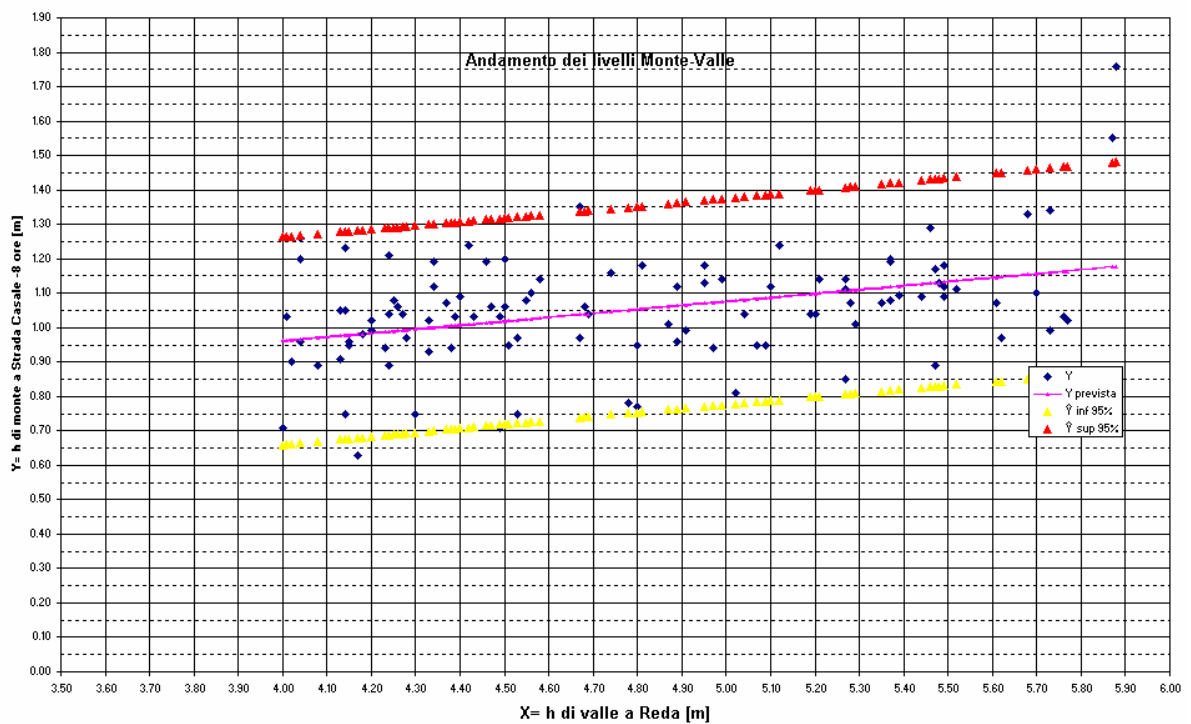
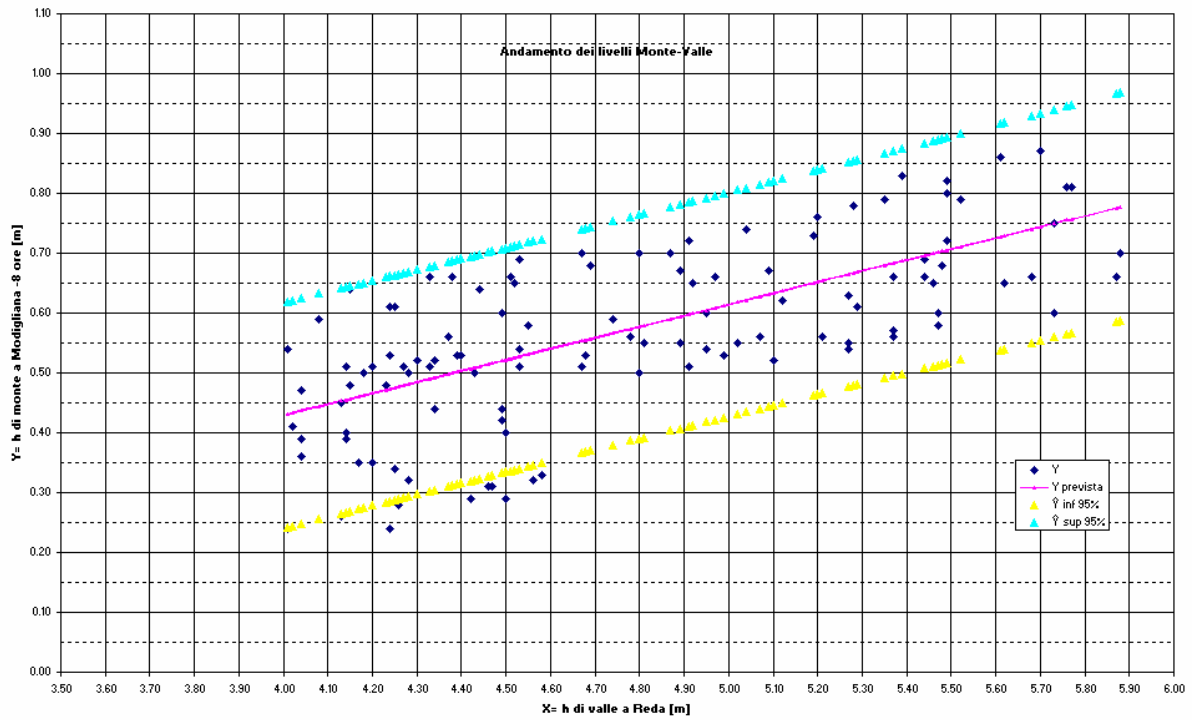


**Figura 14- andamento dei coefficienti di correlazione per le stazioni di Modigliana (rispetto alla stazione di Reda sul Lamone)**

	Modigliana	Reda	Reda-Modigliana
	ore	ore	ore
21/11/1999	4	11	7
26/12/2000	1	8	7
27/12/2000	2	11	9
04/03/2001	2	11	9
03/03/2001	9	18	9
14/04/2001	2	9	7
05/12/2002	0	8	8
<b>media tempi di ritardo</b>			
	<b>[ore]</b>		<b>8.0</b>

**Tabella 4 ritardi nei picchi di piena tra le stazioni di Modigliana (Marzeno) e Reda sul Lamone.**

Un volta individuato il probabile tempo di ritardo pari a  $z$  ore si esaminano gli andamenti dei livelli di valle rispetto ai corrispondenti livelli di monte registrati nelle  $z$  ore precedenti, avendo cura di selezionare solo gli eventi relativi a livelli a valle di interesse, ad esempio limitando l'analisi ai livelli cui corrisponde l'interessamento dei piani golenali.



**Figura 15- Grafico di regressione per le stazioni di Modigliana (sopra) Strada Casale ( sotto) rispetto a Reda sul Lamone.**

Sul grafico (Figura 15) vengono riportate la retta di regressione monte-valle e le fasce di confidenza al 95 % di probabilità; dall'esame dell'ampiezza di tali fasce e dell'andamento dei parametri della regressione (coefficiente  $R^2$ , grado di significatività della regressione, pendenza della retta di regressione in particolare) è possibile avere una prima indicazione di quali stazioni presentino i livelli di correlazione maggiori.

Non risulta però in genere possibile solo sulla base dell'analisi di regressione identificare in maniera univoca il valore di livello di monte corrispondente ad un particolare livello obiettivo di valle. L'incertezza sulla scelta è ben evidente nell' esempio di Figura 15 dall'esame dell'ampiezza delle fasce di confidenza al 95% di probabilità e della conseguente notevole variabilità dei valori plausibili di monte per fissato livello di valle.

Per operare una scelta nell'ambito dei margini emersi dall'analisi di regressione si possono quindi approntare degli indicatori di prestazione, in particolare :

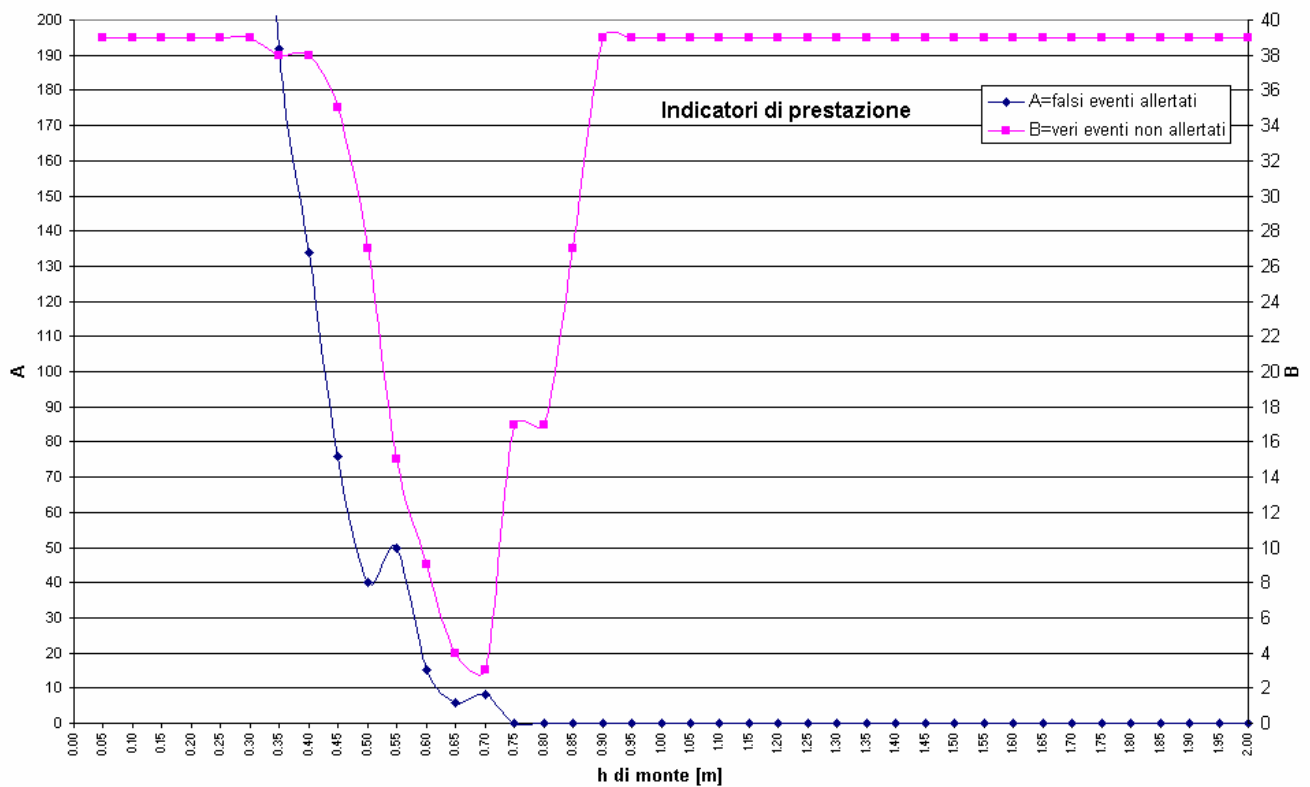
- Indicatore A = falsi eventi allertati
- Indicatore B = veri eventi non allertati

Con la dicitura falsi venti allertati si intende il numero di volte sul campione di dati disponibile (serie storiche di livello) in cui ad un particolare livello di monte scelto non corrisponde il raggiungimento del livello obiettivo di valle nell'arco di un congruo numero  $F$  di ore successive ( $F=12$  ore negli esempi citati).

Analogamente i veri eventi non allertati consistono nel numero di volte in cui ad un fissato livello obiettivo di valle non corrisponde la registrazione del corrispondente livello di monte nelle  $F$  ore precedenti. Tali indicatori hanno chiaramente un valore convenzionale ed in particolare per *evento* si intende la singola misura di livello nel campione (oraria nell'esempio essendo il campione disponibile a tale passo), ragion per cui durante un singolo fenomeno di piena vi possono essere più *eventi* orari di superamento o non superamento, corrispondenti ad esempio al ramo ascendente e discendente dell'idrogramma. Anche per questa ragione i risultati emersi dall'analisi degli indicatori di prestazione appena descritti andrebbero confrontati con quanto realmente accaduto nel corso di alcune piene significative del periodo in esame.

In Figura 16 si riporta ad esempio l'andamento degli indicatori di prestazione per l'individuazione del livello di monte nella stazione di Modigliana (Marzeno)

corrispondente al livello obiettivo di 5 m sul fondo a Reda (Lamone), il minimo particolarmente pronunciato dell'indicatore B suggerirebbe in questo caso di adottare come livello di monte  $h = 0.65$  m, in corrispondenza del quale si registra anche un significativo abbattimento dei falsi eventi allertati A. In Tabella 5 si analizza infine il ritardo effettivamente misurato (*lag* in ore) in alcuni eventi di piena significativi a cui alla registrazione del livello scelto a monte è corrisposto il manifestarsi del livello obiettivo di valle.



**Figura 16- Andamento degli indicatori di prestazione a Modigliana per il livello obiettivo di 5 m a Reda sul Lamone**

	Livello di monte- Modigliana	0.65	m	
	Livello di vale-Reda Modigliana	5	m	
		REDA		lag [ore]
19/11/1999	4	11		7
21/11/1999	7	14		7
26/12/2000				
27/12/2000				
04/03/2001	7	13		6
03/03/2001	0	8		8
14/04/2001	2	10		8
05/12/2002	17	23		6

## **Tabella 5 ritardi nei livelli corrispondenti al livello obiettivo di valle per alcuni eventi di interesse sul Lamone**

Il ritardo con cui si manifesta il livello obiettivo di valle si presenta in genere maggiormente variabile del ritardo relativo al picco di piena precedentemente analizzato, cosa del resto coerente col fatto che il livello obiettivo di valle e il suo corrispondente a monte non si trovano necessariamente in corrispondenza del picco, caratterizzato, come già evidenziato, da maggiore stabilità dei tempi di ritardo con cui si manifesta il fenomeno in una generica sezione a partire dalla piogge che lo generano.

L'analisi proposta vuole del resto fornire uno strumento relativamente semplice e di immediata applicabilità, stante la disponibilità di serie attendibili di livello misurate, per la prima definizione dei livelli di allarme per assegnato livello di valle; valutazioni di maggior dettaglio sono comunque possibili, ad esempio implementando modelli più complessi che considerino anche il legame tra lo stato di piena a valle e le piogge cadute nelle ore precedenti sul bacino o il contemporaneo stato di piena di più sezioni di monte del corso d'acqua principale e degli affluenti di rilievo.

## **6. Bibliografia**

- Maione U., 1995; *Le piene fluviali*, seconda edizione; La Goliardica Pavese, Pavia
- USACE, Hydrologic Engineering Center, 1997; *UNET, One dimensional unsteady flow through a full network of open channels, user's manual*
- USACE, Hydrologic Engineering Center, 2002; *River analysis system HEC-RAS, hydraulic reference manual version 3.1*
- Mazzoli P., 2003 *Elaborazioni idrologiche di bilancio e costruzione di sezioni idrogeologiche nell'ambito del progetto integrato per la tutela dell'acquifero, la lotta alla subsidenza e alla erosione costiera*, ARPA-Ingegneria Ambientale Bologna
- Mazzoli P., 2004 *Ricostruzione delle serie idrologiche di monte-livelli di allarme e preallarme*, Servizio Tecnico di Bacino Fiumi Romagnoli- Ravenna