



**ARPA EMILIA-ROMAGNA  
SERVIZIO IDROMETEOROLOGICO**



**AGENZIA INTERREGIONALE  
PER IL FIUME PO**

Progetto esecutivo

Sistema di modellistica idraulica  
per la previsione delle piene fluviali  
dell'asta principale del fiume Po

GIUGNO 2005

## **INDICE**

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>LE PIENE STORICHE PRINCIPALI</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>LA DEFINIZIONE DEI DATI NECESSARI ALLA MODELLISTICA, ALLA PREVISIONE E AL CONTROLLO DELLA PROPAGAZIONE DELLA PIENA</b>	<b>8</b>
3.1	Indagini di campo e analisi conoscitive	9
3.2	Analisi idrologica e idraulica	10
<b>4</b>	<b>GLI STRUMENTI NUMERICI DI SIMULAZIONE</b>	<b>10</b>
4.1	I modelli idraulici	13
4.2	I modelli di scenario	39
<b>5</b>	<b>LE PREVISIONI DEI CENTRI FUNZIONALI REGIONALI</b>	<b>41</b>
5.1	I bacini lombardi ed emiliani	41
5.1.1	Modelli meteorologici	41
5.1.2	I modelli idrologici	44
5.2	I bacini piemontesi	62
<b>6</b>	<b>AUTOMAZIONE E VISUALIZZAZIONE</b>	<b>66</b>
6.1	Scheduling dei task computazionali	67
6.2	Visualizzazione e amministrazione web	72
<b>7</b>	<b>IL CENTRO OPERATIVO</b>	<b>76</b>
7.1	Le attività di realizzazione del Centro Operativo	77
7.2	Le attività di carattere ordinario	78
7.3	Le attività di carattere straordinario	79
<b>8</b>	<b>SPECIFICHE TECNICHE E MODALITÀ DI ESECUZIONE</b>	<b>80</b>
<b>9</b>	<b>PROGRAMMA TEMPORALE E COSTI DI REALIZZAZIONE E DI ESERCIZIO DEL SISTEMA</b>	<b>81</b>
9.1	Personale	81
9.2	Attivazione del Centro Operativo e implementazione dei modelli	81
9.3	Attività di carattere ordinario (aggiornamento rilievi, scale di deflusso, modelli, ...)	82
9.4	Tempi di esecuzione	82

## 1 PREMESSA

Già a partire dal XVI secolo il fiume Po risultava arginato con notevole continuità dal territorio mantovano al mare; successivamente e con particolare accelerazione immediatamente a valle degli eventi alluvionali più significativi lo sviluppo delle arginature è stato esteso verso monte sia sul Po che sui principali tributari, fino alla situazione attuale dove risultano arginati con continuità circa 860 km di asta fluviale di Po e circa 1420 km di asta degli affluenti.

La diminuzione della frequenza dei fenomeni di rotta in seguito agli interventi di consolidamento dei rilevati arginali nel tempo effettuati e la crescente estensione verso monte dello sviluppo delle stesse arginature con la conseguente sottrazione di porzioni significative di pianura alluvionale ai processi di laminazione della piena, ha comportato un progressivo e significativo aumento dei livelli e delle portate defluenti lungo l'asta. Tale fenomeno è documentato confrontando a partire dal 1800 il progressivo aumento dello sviluppo delle arginature dell'asta del Po e l'entità dei livelli di piena osservati alla stazione di Pontelagoscuro.

Nel merito dei valori idrometrici al colmo lungo l'asta si evidenzia quanto riportato dal prof. Giulio De Marchi in un rapporto del 1952 : *“è d'altra parte un fatto accertato che le piene di Po sono andate progressivamente aumentando nel corso degli ultimi secoli, ed è pure certo che esse aumenteranno ancora in avvenire. I livelli della piena a Pontelagoscuro si sono elevati di un metro durante il secolo decimottavo, di un metro e mezzo nel secolo successivo e, se badiamo all'andamento che secondo il Servizio Idrografico avrebbe avuto la piena ultima qualora non fosse intervenuta la rotta di Occhiobello, si sarebbero elevati di un altro metro nell'ultimo cinquantennio”*.

L'affermazione del prof. De Marchi che peraltro era accompagnata da una serie di illuminanti osservazioni in merito alla necessità di rivedere e ripensare il sistema arginato in modo da poter gestire in modo accurato anche eventi di piena non contenibili dal sistema arginato, evidenzia quello che poi si è verificato sia nella piena del 1994 che in quella del 2000 in cui in particolare sono stati superati nel tratto medio dell'asta (Piacenza, Cremona, Casalmaggiore) i valori massimi storici dell'evento del 1951.

Di contro il progressivo aumento delle quote di sommità delle arginature effettuato nel corso degli anni per fronteggiare l'innalzamento costante dei livelli, ha comportato il raggiungimento su gran parte dell'asta inferiore del Po di condizioni limite strutturali non più significativamente aumentabili.

Tutto quanto premesso per evidenziare come l'attuale sistema arginato del fiume Po, per quanto ben realizzato, monitorato e mantenuto nel tempo non può garantire, come qualsiasi altra opera idraulica, un livello di sicurezza assoluto per il territorio circostante, sia in relazione a scenari di rottura arginale sia in relazione a scenari di tracimazione.

L'entità del rischio residuale deve essere dunque presa in considerazione, valutata e gestita con opportuni interventi di carattere strutturale e non strutturale.

Fra questi ultimi assume importanza strategica la messa a punto di un sistema di modellazione, previsione e controllo della propagazione della piena del fiume Po di cui il presente allegato tecnico illustra i contenuti.

Per sistema di modellazione, previsione e controllo della propagazione della piena del fiume Po si intende l'insieme delle azioni necessarie a definire, con un margine di errore accettabile e, nel caso della gestione di un evento in tempo reale, con un adeguato anticipo temporale, l'entità dei livelli idrometrici e delle portate lungo l'asta fluviale.

La finalità è sì quella di fornire un adeguato strumento modellistico al pianificatore, ma anche e soprattutto di permettere con adeguato anticipo l'organizzazione del servizio di piena e di tutte le azioni di difesa del suolo e di protezione civile necessarie alla gestione in tempo reale delle situazioni di emergenza. Ed è proprio nella parziale adiacenza e parziale sovrapposizione di tali bisogni di tempo reale e tempo differito che emerge imprescindibile la necessità di coordinare lo sviluppo e la gestione di un tale strumento integrato tra tutti gli attori che ne hanno la necessità e/o che possono contribuire alla sua migliore riuscita.

La modellistica e la previsione della piena dell'asta principale del Po deve essere quindi effettuata nell'ambito di un centro operativo interregionale e interagenziale, mediante: osservazioni continuative permanenti dei fenomeni meteorologici, idrologici e idrometrici in atto; individuazione e monitoraggio dei principali precursori di evento per la piena di Po; utilizzo di opportuni modelli idrodinamici che consentano di stimare su diversi orizzonti temporali di anticipo l'entità dei livelli idrici e delle portate lungo l'asta.

La scala spaziale di analisi è quella dell'asta principale del fiume Po; per tal motivo i fenomeni da osservare, monitorare e prevedere devono essere quelli connessi all'intero bacino del fiume Po.

Obiettivo principale è quello di poter disporre, in modo univoco sull'intero bacino padano, di un sistema modellistico di previsione sull'asta del Po, automaticamente connesso in tempo reale ai sistemi modellistici di previsione idrologica-idraulica gestiti dai Centri Funzionali regionali del bacino del Po, in grado di trasmettere agli Enti competenti per

legge i dati necessari all'organizzazione delle attività di servizio di piena e di protezione civile necessarie a fronteggiare situazioni di emergenza. Tale obiettivo sarà perseguito attraverso la realizzazione di un sistema di modellazione e previsione delle piene fluviali dell'asta principale del fiume Po, integrato ai modelli previsionali dei Centri Funzionali regionali. In particolare, l'ambito idrografico di applicazione del presente progetto comprenderà l'intera porzione di bacino del Po situata a valle della confluenza con il Ticino (Ticino compreso). L'input idrometrico di stato, simulato e previsionale, relativo alla parte di bacino situata a monte della confluenza con il Ticino, verrà acquisito dal sistema di previsione e gestione in dotazione all'ARPA Piemonte.

Il sistema integrato, di cui al presente progetto, verrà convenientemente impiegato per fornire alle autorità, ai soggetti istituzionali ed agli organi territoriali preposti alla gestione dell'emergenza le informazioni relative all'insorgenza ed evoluzione del rischio idrogeologico ed idraulico, legate al manifestarsi di eventi meteoidrologici particolarmente intensi tali da generare situazioni di dissesto per il territorio nonché di pericolosità per la popolazione.

Nelle sue funzioni di carattere ordinario connesse ad esempio all'aggiornamento dei rilievi topografici, delle scale di deflusso, all'implementazione dei modelli di simulazione, il sistema integrato dovrà avere caratteristiche di interfunzionalità e multifunzionalità per poter servire altrettanto bene le necessità della pianificazione di bacino e della programmazione in materia di difesa del suolo e di gestione delle risorse idriche.

## 2 LE PIENE STORICHE PRINCIPALI

La complessa configurazione idrografica e orografica del bacino padano, composto da corsi d'acqua alpini e collinari (Piemonte), alpini regimati da laghi (Lombardia) e appenninici (Emilia), con regimi idrologici abbastanza differenziati, comporta durante gli eventi di pioggia una certa varietà di situazioni nel decorso delle piene lungo il Po, connessa alla diversa distribuzione spazio-temporale dei deflussi provenienti dai tributari.

Le informazioni sulle piene storiche consentono di delineare quattro scenari principali, che definiscono i tipi di associazione più frequente di bacini contribuenti alla piena lungo il Po, ricadenti in uno o più territori regionali.

- *Primo tipo (piemontese)*

La piena ha il contributo quasi sempre rilevante soprattutto di Sesia, Tanaro e Ticino, cui si associano di volta in volta, con apporti più o meno sensibili, i tributari dell'arco alpino occidentale e talora, con deflussi più modesti, anche alcuni corsi d'acqua dell'Appennino Pavese (Staffora e Scuropasso). Il settore di bacino coinvolto è quello occidentale o centro-occidentale; rientrano in questo tipo gli eventi del 1705, 1755, 1857, 1907, 1994 e 2000 tutti avvenuti nella stagione autunnale.

- *Secondo tipo (lombardo)*

La piena è formata in misura determinante dalla partecipazione simultanea di Ticino, Lambro, Adda e Oglio; il bacino è coinvolto fondamentalmente nel settore centrale, percorso dagli emissari lacustri lombardi. Sono assegnabili a questa tipologia le piene del 1807, 1812 e 1868, tutte avvenute, come nel tipo precedente, durante i mesi autunnali e con gravi inondazioni, nel 1807 in sinistra Po, tra il Mantovano e il Polesine di Rovigo; nel 1812 in destra Po, nel territorio ferrarese; durante l'evento del 1868 ancora in sinistra Po, nel Pavese e soprattutto nel territorio a valle di Cremona. Le rotte principali aperte dalle piene del 1807 e del 1812 furono prodotte da sormonto degli argini o da processi erosivi al piede dei rilevati in frodo; questo dimostra che i manufatti del tratto inferiore del fiume, erano ancora diffusamente soggiacenti ai livelli di massima piena e localmente, ove prossimi all'alveo, non erano sufficientemente difesi. Nel 1868 in provincia di Pavia e di Cremona molte rotte si formarono per sifonamento.

- *Terzo tipo (piemontese-lombardo)*

La piena si forma per i contributi determinanti di Sesia e Tanaro, contraddistinto quest'ultimo da portate elevate per gli apporti straordinari di Belbo, Bormida e Orba, e dagli apporti notevoli di Adda e Oglio, poco inferiori ai livelli massimi. A questi fiumi si associano di volta in volta alcuni tributari piemontesi (Scrivia o Dora Baltea) e altri corsi d'acqua lombardi (Olona e Lambro), tutti con piene non molto elevate, ma importanti perché coincidenti con il passaggio del colmo lungo l'asta del Po. Saltuariamente sono presenti moderati contributi da singoli corsi d'acqua appenninici emiliani. In questo tipo di evento vengono per lo più coinvolti i bacini del versante alpino centrale e occidentale; ricadono in questo scenario le piene del 1801, del 1917 e del 1926, manifestatesi nella stagione autunnale la prima e nei mesi primaverili le altre due.

- *Quarto tipo (intero bacino padano)*

La formazione della piena origina dal contributo di un numero elevato di corsi d'acqua, del sistema idrografico padano. Sistematically il contributo iniziale perviene da vari gruppi di affluenti del settore occidentale, tra i quali è costante quello del Sesia e frequente quello del Tanaro. Più a valle, in sinistra di Po, si hanno con analoga ripetitività le piene dell'Olonza e del Lambro, cui si associano con elevata frequenza quelle dell'Adda e dell'Oglio; tra i corsi d'acqua del versante appenninico ricorre costantemente l'apporto dei tributari dal Parma al Panaro e, più saltuariamente, dei torrenti dell'Oltrepò Pavese e del Piacentino. Sono rappresentativi di questo tipo gli eventi del 1839, del 1872, del 1879 e del 1951 che, con esclusione di quello del 1879 avvenuto nella tarda primavera, si sono manifestati nei mesi autunnali.

Nel corso di questi quattro eventi le altezze d'acqua del Po superarono quasi sempre, in diverse sezioni e talora abbondantemente, i livelli precedentemente raggiunti; in particolare nel 1951 tale superamento venne registrato a tutte le stazioni idrometriche tra la confluenza del Ticino e Pontelagoscuro. All'eccezionalità delle altezze idrometriche lungo l'asta del Po abbastanza raramente tuttavia corrisponde un'assoluta straordinarietà delle piene nei diversi tributari coinvolti nel medesimo evento. Considerando gli affluenti più importanti, si nota che raggiunsero misure pari o molto prossime ai valori massimi solo l'Oglio nel 1839, il Panaro nel 1872, il Tanaro e il Secchia nel 1879, il Sesia e nuovamente il Tanaro nel 1951. Un ruolo determinante ebbe piuttosto la successione di coincidenze dei colmi di piena che, se pur moderati, pervennero al Po da parte di numerosi tributari.

Nell'ambito degli eventi di piena storici è possibile individuare un certo numero di corsi d'acqua tributari che con maggiore ripetitività hanno determinato o concorso a determinare le piene del Po:

- i fiumi del settore piemontese, la cui partecipazione risulta in gran parte degli eventi; tra i corsi d'acqua coinvolti emergono il Sesia e il Tanaro, per il contributo spesso determinante fornito per lo più da entrambi (piene del 1705, 1755, 1801, 1857, 1872, 1879, 1917, 1926 e 1951);
- tra gli emissari dei grandi laghi lombardi si pone in maggior evidenza il Ticino, per l'essenziale apporto alle piene del 1705, del 1755 e 1868 e per i contributi forniti in altre 3 occasioni; l'Adda e l'Oglio hanno partecipato con massime piene agli eventi del 1812 e del 1868, pur fornendo un apporto sensibile in almeno altre 4 occasioni;

- i corsi d'acqua del versante appenninico raramente determinano un rilevante contributo; volumi d'acqua di una certa importanza sono pervenuti da Secchia e Panaro solo in occasione degli eventi del 1839 e del 1872.

Nel quadro di dati sopra esposti si possono collocare i recenti eventi del 1994 del 2000: quello del 1994 generato pressoché esclusivamente dalle piene dei corsi d'acqua piemontesi, tra cui in particolare il Tanaro e il Sesia; quello del 2000 generato anch'esso dall'apporto dei corsi d'acqua piemontesi, tra cui in particolare la Dora Baltea, la Dora Riparia, il Sesia.

### 3 LA DEFINIZIONE DEI DATI NECESSARI ALLA MODELLISTICA, ALLA PREVISIONE E AL CONTROLLO DELLA PROPAGAZIONE DELLA PIENA

Sulla base di una analisi dettagliata delle attuali procedure di allertamento e intervento degli Enti che oggi esercitano una funzione di servizio di piena, gli elementi necessari per i requisiti del sistema possono essere così definiti:

- definizione delle chiusure di bacino alle quali i Centri Funzionali trasmetteranno i risultati della loro modellistica;
- dettaglio della schematizzazione geometrica del sistema di generazione delle onde di piena (bacini idrografici di riferimento) e di propagazione lungo le aste fluviali (sezioni, tratti di infittimento, modalità specifiche di rappresentazione delle opere presenti, ecc.);
- modalità di rappresentazione dei flussi golenali e delle aree di espansione/laminazione;
- sensibilità delle simulazioni idrodinamiche in termini di output dei livelli previsti in funzione degli input (precipitazione e livelli idrometrici, oltre alle caratteristiche fisiografiche del bacino e alle scale di deflusso alle sezioni di riferimento);
- frequenza di acquisizione dei dati di monitoraggio;
- estensione possibile dei tempi di previsione;
- frequenza e modalità di emissione dei risultati della modellistica previsionale;
- possibilità di intervenire sul sistema modellistico in tempo reale per verificare le conseguenze ipotetiche di determinate azioni e/o scenari di intervento.



La realizzazione del sistema di previsione dovrà valorizzare opportunamente il patrimonio di tutti i Gestori dei sistemi di monitoraggio, costituito dalla disponibilità di reti di telemisura, equipaggiamenti hardware e basi di dati.

### *3.1 Indagini di campo e analisi conoscitive*

Le stazioni idrometriche esistenti da prendere in considerazione per l'inserimento nel sistema di previsione sono quelle ricomprese nei sistemi osservativi degli Enti aderenti alla convenzione cui il presente progetto si riferisce, se del caso dopo una verifica del Gruppo di Coordinamento Unificato. Dovranno quindi essere analizzate le caratteristiche delle stazioni di misura esistenti in rapporto ai requisiti prestazionali necessari per il corretto e affidabile funzionamento del sistema di previsione.

In particolare, dovranno essere caratterizzati i seguenti aspetti:

- idoneità tecnologica dei dispositivi strumentali e degli impianti accessori;
- affidabilità dell'apparato strumentale complessivo
- idoneità del sistema di acquisizione-trasmissione dati (dal punto di vista sia tecnologico, sia gestionale);

ma anche:

- morfologia e tendenza evolutiva dell'alveo per quanto riguarda gli effetti sull'affidabilità e stabilità delle scale di deflusso, con attenzione alle eventuali possibili opere in alveo necessarie a migliorare la rispondenza e affidabilità delle curve di taratura idraulica.

In base ai risultati della suddetta analisi i singoli Gestori potranno, eventualmente, procedere all'esecuzione di interventi necessari di riqualificazione del sistema di monitoraggio, secondo criteri, quanto più possibile, di unificazione degli standard tecnologici e di congruenza con quelli assunti per le stazioni e gli impianti di nuova installazione.

Si farà in ogni caso riferimento, per tutte le questioni inerenti l'adeguatezza del sistema di monitoraggio idro-meteo-pluviometrico del bacino del Po e dei relativi sistemi trasmissivi dell'informazione, al Comitato Tecnico del Compartimento Idrografico del Fiume Po, costituito all'interno dell'Accordo/Convenzione Interregionale del bacino del Po, a sua volta stipulato ai sensi dell'Accordo Governo-Regioni del 24 Maggio 2001 attuativo dell'Art 92 del DLvo 112/98.

L'estensione e le caratteristiche del sistema informativo cartografico di supporto al sistema di previsione saranno funzionali ai requisiti del dispositivo modellistico proposto e ai dati disponibili al momento dell'implementazione del sistema. Saranno comunque acquisite, organizzate e verificate in termini di corrispondenza altimetrica tra le basi cartografiche adottate e utilizzate dai vari Enti, eseguendo un esame critico dei dati cartografici in rapporto alle esigenze del modello di previsione, indicando il livello prestazionale raggiungibile con le basi disponibili e gli ampliamenti, le revisioni, le integrazioni dei rilievi territoriali necessari per consentire al sistema di raggiungere il massimo livello di funzionalità.

Dalle campagne pregresse e dagli aggiornamenti specifici in possesso, in particolare, dall'Autorità di Bacino del fiume Po e dall'A.I.PO saranno acquisite e analizzate le sezioni fluviali di rilievo, riferite alle diverse fonti e ai diversi periodi di indagine; saranno quindi effettuati i necessari confronti e verifiche finalizzati alla costituzione del quadro di sezioni da adottare come base per le applicazioni modellistiche.

### *3.2 Analisi idrologica e idraulica*

Si farà anche riferimento ai principali studi pregressi che hanno trattato i fenomeni idrologici e idrodinamici relativi all'asta del Po e affluenti (a carattere complessivo di asta fluviale e/o per tratti significativi) mediante applicazioni di modellistica stocastica e deterministica.

Il materiale conoscitivo sarà poi organizzato e analizzato criticamente per costituire base per la definizione degli elementi di interesse utilizzabili per il progetto, in relazione allo stato attuale delle conoscenze idrologiche, alla morfologia-fisiografia del sistema "bacino Po" e all'attuale assetto delle opere di protezione dalle piene e degli strumenti normativi in atto e/o previsti.

## **4 GLI STRUMENTI NUMERICI DI SIMULAZIONE**

Negli ultimi anni la richiesta di strumenti di controllo delle piene fluviali è aumentata considerevolmente, specialmente laddove il rischio di esondazione riguarda aree a forte sviluppo urbano. Un modo adeguato di affrontare questa domanda è l'applicazione di un sistema di previsione delle piene capace di fornire previsioni di portate e livelli allo scopo di

allertare opportunamente le autorità locali circa i livelli attesi e l'estensione spaziale della possibile inondazione.

E' molto importante che il sistema sia capace di produrre previsioni accurate e con adeguati tempi di preavviso, poiché operazioni quali, ad esempio, l'evacuazione di aree a rischio risultano critiche rispetto alla qualità di tali informazioni.

Un fenomeno di inondazione è quasi sempre causato dallo straripamento di un fiume a seguito di intense precipitazioni e un sistema di previsione richiede perciò informazioni in tempo reale e previste sulle piogge e sulle condizioni del corso d'acqua nell'area, unitamente ad un'adeguata descrizione del processo afflussi–deflussi e dell'idrodinamica del fiume.

Il paragrafo presente descrive i requisiti metodologici, tecnologici e organizzativi che andranno a costituire la base del proposto sistema operativo di previsione e gestione in tempo reale delle piene fluviali per l'asta principale del fiume Po, a supporto delle attività di competenza degli Enti nazionali, interregionali e delle singole Regioni territorialmente interessate.

La moderna pratica della previsione delle piene fa uso di modelli numerici idrologici, i quali impiegano variabili meteorologiche e idrologiche misurate (entrambe) o previste (le prime) come dati di inizializzazione del sistema di previsione. Le portate previste alla chiusura dei bacini montani possono quindi essere utilmente impiegate in un modello numerico di trasferimento a scala di bacino o locale, in modo da prevedere livelli e portate in una specifica sezione idrometrica, ovvero anche i campi distribuiti dei livelli idrici e delle velocità di flusso laddove sia disponibile un adeguato modello digitale del terreno.

Per bacini sufficientemente estesi, caratterizzati da tempi di propagazione della piena dell'ordine del giorno o di alcuni giorni, tale sistema è in grado di realizzare previsioni dei livelli idrici futuri in tempo utile per la gestione delle azioni da intraprendere. L'affidabilità di tali previsioni diminuisce, naturalmente, sia all'aumentare della scadenza temporale delle previsioni (in tali sistemi gli errori meteorologici, idrologici e composti crescono costantemente col tempo), sia al diminuire della superficie del bacino (e quindi al diminuire del tempo di corrivazione), poiché per bacini più piccoli (e a parità di scadenza temporale della precipitazione) occorre fare sempre più uso della previsione meteorologica (affetta a sua volta da errori crescenti nel tempo) e sempre meno delle precipitazioni e dei livelli idrografici osservati.

Il sistema di previsione delle piene fluviali utilizzerà in input le portate affluenti in Po derivanti dalle previsioni meteo-idrologiche messe a disposizione dai centri funzionali regionali e consisterà dei seguenti componenti:

- modelli idraulici per la propagazione della piena nei tratti alveati;
- modelli di inondazione fluviale.

La calibrazione della modellistica idrodinamica dovrà essere eseguita simulando eventi di piena significativi verificatisi nell'ultimo decennio, comprendenti sia le piene più gravose, sia piene secondarie di minore entità.

Contestualmente alla calibrazione verranno eseguite analisi di sensitività riferite sia ai parametri di scabrezza sia alla schematizzazione geometrica del sistema fluviale e delle opere, anche al fine di evidenziare le situazioni di carenza conoscitiva e le esigenze di infittimento e aggiornamento dei rilievi topografico-batimetrici.

Il modello calibrato verrà applicato inoltre per eventi di piena caratteristici (portate al colmo e idrogrammi relativi ad assegnati tempi di ritorno) in rapporto a diverse combinazioni di contributi degli affluenti, per simulare scenari di riferimento sull'evoluzione dei fenomeni di piena e per rappresentare gli effetti degli interventi di controllo ipotizzabili sul sistema golenale dell'asta del Po.

In un numero selezionato di sezioni caratteristiche verranno parametrizzati i livelli, i franchi di sicurezza e i tempi di traslazione delle onde di piena, relativi agli scenari di riferimento principali.

Questi elementi costituiscono una preliminare base-dati relativa ai parametri idraulici attesi lungo l'asta fluviale per applicazioni off-line dei risultati modellistici nella previsione della propagazione di eventi di piena noti in corrispondenza delle sezioni strumentate.

Il modello idrodinamico di base on-line deriverà dall'applicazione off-line con gli adattamenti opportuni per la gestione della simulazione e previsione in tempo reale, in ordine ai seguenti aspetti principali:

- tempi di elaborazione;
- interfaccia con banche dati di supporto;
- interfaccia con gli utenti;
- produzione degli output.

Oltre alla rappresentazione dei fenomeni di formazione e propagazione degli idrogrammi di piena, il modello sarà in grado di applicare in automatico procedure di auto-allineamento istantaneo della simulazione in corrispondenza delle stazioni di misura e di analisi e

visualizzazione dei risultati (livelli e portate) in relazione ai livelli di guardia, ai franchi disponibili e agli altri eventuali parametri di sicurezza idraulica stabiliti localmente nelle analisi off-line.

Attraverso procedure di semplice e rapida applicazione si dovranno simulare sul modello quasi-bidimensionale gli effetti di interventi per il controllo della piena (controllo e regolazione delle espansioni in specifiche aree golenali, manovre su opere di regolazione, ecc.) o situazioni di criticità osservate o previste (parziale occlusione dei ponti o di altre sezioni critiche, rotte o sormonti arginali in punti critici precedentemente individuati con l'analisi off-line, ecc.).

Nei paragrafi successivi sono descritte brevemente le caratteristiche essenziali per la modellistica necessaria alla realizzazione del presente sistema di previsione delle piene fluviali per l'asta principale del fiume Po.

#### *4.1 I modelli idraulici*

La simulazione idrodinamica consentirà, invece, il calcolo del flusso in reti di canali a pelo libero, naturali ed artificiali, comunque connesse e con eventuali caratterizzazioni quasi-2D (collegamenti tra canali di flusso e celle di esondazione).

Il modello, funzionante in moto vario, verrà allestito sulla base degli elementi geometrici (sezioni trasversali, rilievi di opere) e cartografici acquisiti, analizzati e organizzati durante l'attività di raccolta delle informazioni necessarie.

La schematizzazione monodimensionale sarà adottata nei tratti di alveo monocursali con limitato sviluppo di sistemi golenali aperti.

La schematizzazione quasi-bidimensionale dovrà essere implementata in modo opportuno per la corretta rappresentazione di sistemi golenali chiusi o particolarmente estesi e di opere di laminazione controllata del colmo di piena presenti, di tratti di paleoalveo funzionalmente connessi con l'alveo attivo e in generale di tutte le situazioni morfologiche e idrodinamiche caratterizzate dalla presenza di più linee di flusso e di significativi fenomeni localizzati di espansione e laminazione.

Nel seguito vengono brevemente descritti i modelli idrodinamici impiegati nel sistema di modellistica di cui al presente progetto.

## Il modello idrodinamico MIKE11-HD

MIKE 11 HD del Danish Hydraulic Institute Water & Environment è un programma generale per la simulazione del flusso in condizioni monodimensionali, stazionarie e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. E' possibile tenere conto in particolare di:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso quasi-bidimensionale;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e convergenti).

### *Equazioni del moto*

MIKE 11 risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- a) Il fluido è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità.
- b) La pendenza del fondo è piccola.
- c) Le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

dove:

A = area della sezione bagnata (m<sup>2</sup>);

C = coefficiente di attrito di Chezy (m<sup>1/2</sup> s<sup>-1</sup>);

g = accelerazione di gravità (m s<sup>-2</sup>);

$h$  = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);

$Q$  = portata ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$R$  = raggio idraulico (m);

$\alpha$  = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

$q$  = portata laterale addotta ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

Per le correnti veloci viene applicata un'equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

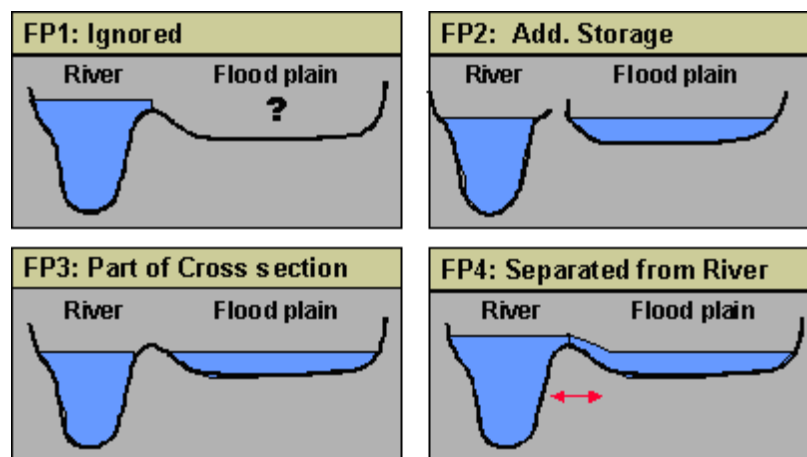
La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

#### *Schematizzazione geometrica*

In funzione delle caratteristiche geometriche e del comportamento idrodinamico dei singoli tratti del sistema fluvio-golenale da rappresentare saranno assunte schematizzazioni di tipo monodimensionale o quasi-bidimensionale.

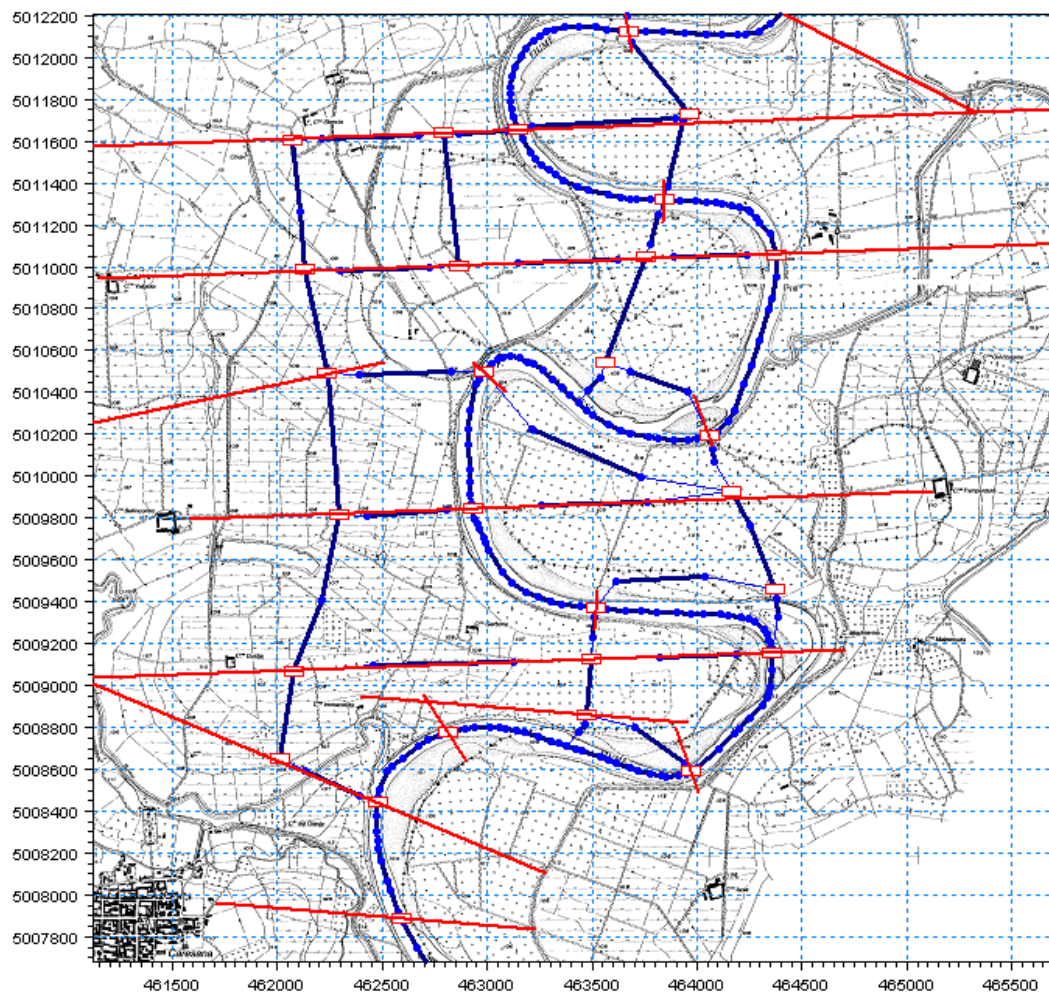
La figura che segue rappresenta, a titolo esemplificativo, le possibili schematizzazioni delle aree golenali che possono essere considerate nell'ambito di un modello idrodinamico monodimensionale.



Possibili schematizzazioni delle aree golenali nell'ambito di un modello idrodinamico monodimensionale

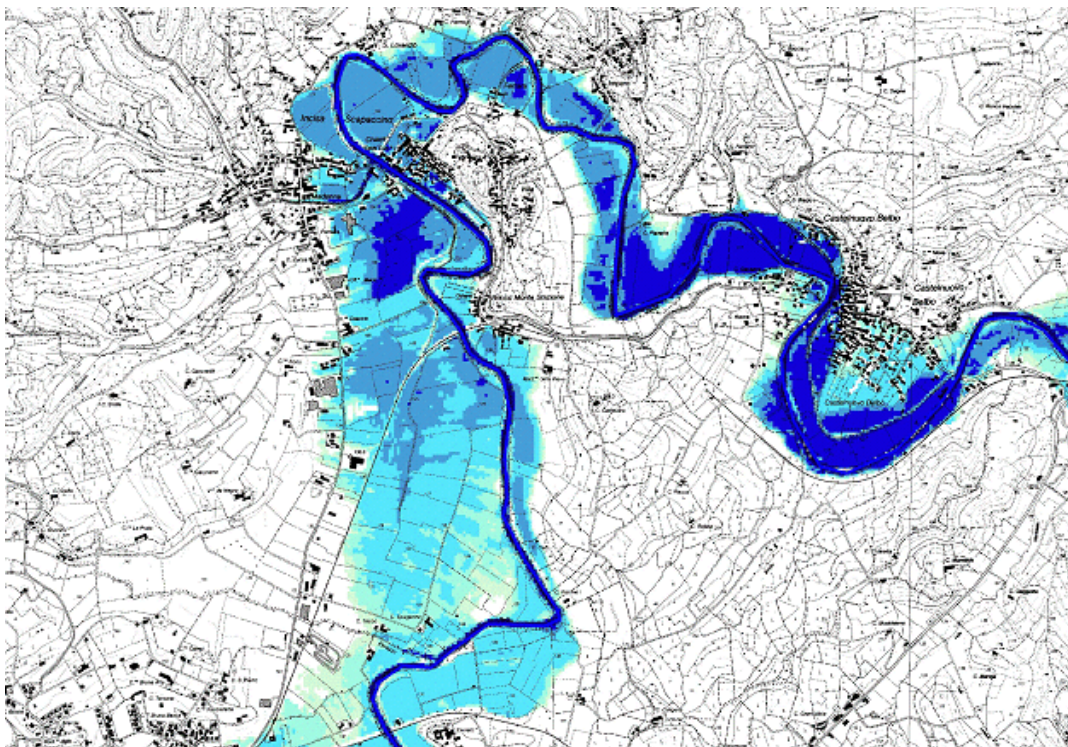
- FP1: l'effetto dell'area golenale è trascurato, sia come contributo al deflusso che come contributo alla laminazione; questo schema sarà utilizzato solo in caso di aree golenali di dimensione modeste, con livelli di piena quasi totalmente contenuti nell'alveo inciso ed effetti di laminazione del tutto trascurabili;
- FP2: viene trascurato il contributo al deflusso dell'area golenale, ma viene simulato l'effetto di invaso e laminazione in essa; questo schema sarà utilizzato nel caso in cui le velocità di deflusso longitudinale in golena siano circa nulle (golene chiuse, aree di invaso o allagamento temporaneo non connesse o solo in parte connesse con aree golenali poste a valle di esse);
- FP3: l'area golenale viene considerata come parte integrante l'alveo inciso e quindi contribuisce al moto e alla laminazione delle portate al colmo; questo schema sarà utilizzabile solo nei casi di aree golenali con limitata estensione e quote corrispondenti a quelle spondali dell'alveo inciso; il deflusso in golena avviene lungo direzioni sub-parallele a quelle del flusso nell'alveo inciso e le quote di pelo libero in alveo e in golena sostanzialmente coincidono;
- FP4: il deflusso e/o l'attivazione-invaso delle aree golenali sono simulati con uno schema quasi-2D costituito da rami e/o celle di invaso rappresentanti le golene, connessi al tronco relativo all'alveo inciso mediante speciali strutture chiamate "lateral weir" che, con uno schema di deflusso a stramazzo, simulano lo sfioro sopra i rilevati arginali o stradali che separano tra loro le aree golenali e queste dall'alveo inciso; con questo schema saranno rappresentate configurazioni alveo+golene più complesse, simulando condizioni di livello, portata, direzione di flusso ed invaso che dipendono dalle reali caratteristiche topografiche ed idrodinamiche dei singoli elementi introdotti nel modello.





Schema di modello quasi-bidimensionale realizzato in corrispondenza di un tratto fortemente meandrizzato del fiume Sesia: la schematizzazione quasi-2d è realizzata mediante canali di deflusso golenali e celle di invaso collegati all'alveo principale mediante "link" di connessione.

L'utilizzo di una schematizzazione di tipo quasi-bidimensionale permette di descrivere nel dettaglio il comportamento della corrente in piena, definendo anche i livelli di esondazione ed i tiranti idrici che si formano nelle aree allagate e consentendo, con un adeguato supporto GIS, la rappresentazione di mappe dei tiranti e delle velocità più dettagliate rispetto all'elaborazione degli output di uno schema monodimensionale.



Esempio di risultato di un modello quasi - bidimensionale, rappresentazione dei tiranti idrici sul territorio.

In MIKE 11 HD la descrizione di ogni struttura viene effettuata in un segmento di corso d'acqua, in base a possibilità di schematizzazione diversificate in funzione della tipologia di opera considerata.

### *Resistenza d'attrito*

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler.

Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{C^2AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{M^2AR^{4/3}}$$

dove M è il coefficiente di Strickler, pari a  $1/n$ , essendo n il coefficiente di Manning.

### *Condizioni iniziali e condizioni al contorno*

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

Le condizioni al contorno sono esterne ed interne. Quelle interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne, attrito indotto dal vento. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di  $h$  e  $Q$ , valori di  $h$  e  $Q$  variabili nel tempo, relazioni tra  $h$  e  $Q$  (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

### *Metodo di soluzione*

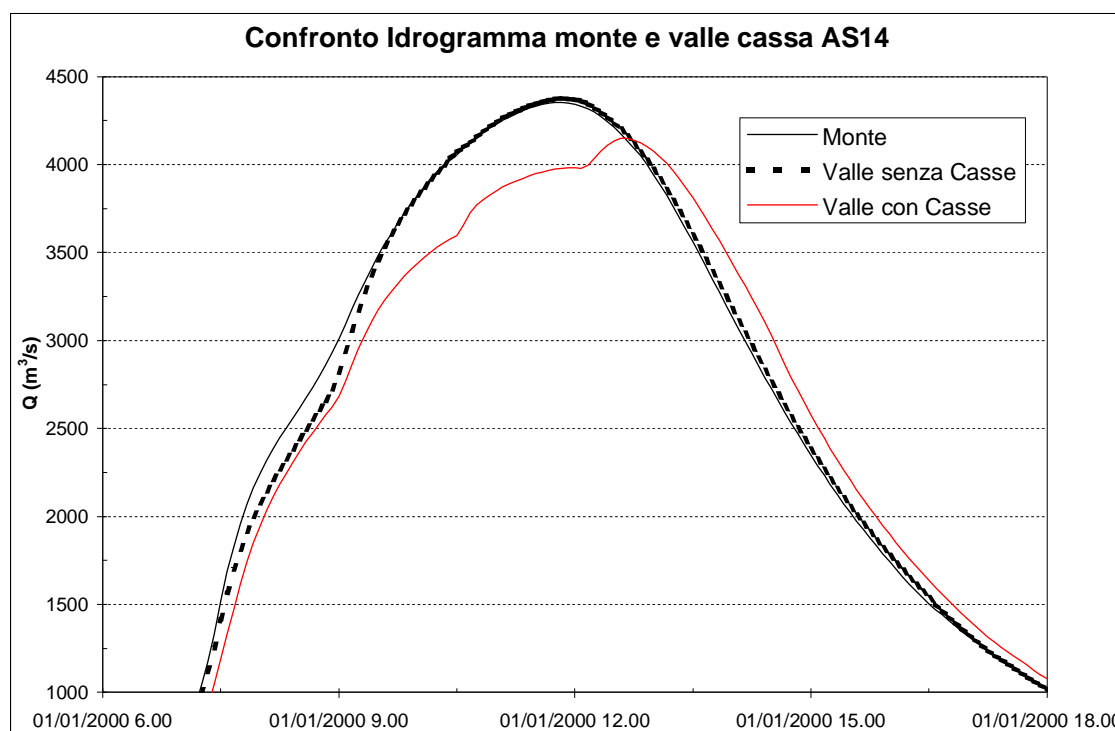
Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti  $Q$  e  $h$  alternati tra loro, nei quali la portata  $Q$  e il livello idrico  $h$ , rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).

La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti  $Q$  sono posizionati sempre a metà tra due punti  $h$  vicini;
- la distanza tra due punti  $h$  può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto  $h$ ;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto  $Q$ .

### *Variazioni dell'assetto geometrico*

Per tener conto delle prevedibili variazioni di assetto nel corso delle piene per effetto di parziale ostruzione delle strutture, di rotte arginali o di possibili interventi di controllo delle piene, saranno predefinite e testate off-line diverse schematizzazioni del sistema fluvio-golenale, attivabili in opzione nel corso delle simulazioni di previsione.



Variazione dell'idrogramma di portata lungo un corso d'acqua simulato con schemi geometrici diversificati in assenza (linea nera tratteggiata) od in presenza (linea rossa) di una serie di casse di espansione.

### *Modulo DA (Data Assimilation)*

A supporto delle simulazioni di previsione in tempo reale sarà implementato il modulo Data Assimilation, che consente di adattare la simulazione ai dati di monitoraggio acquisiti in tempo reale da una specifica stazione idrometrica (livelli e/o portate), in modo da non propagare verso valle gli effetti di eventuali errori del modello di previsione.

L'attivazione del modulo nel corso della simulazione è opzionale in ogni specifica sezione di riferimento, e funzionale al grado di affidabilità della stazione di misura (e della relativa scala di deflusso) e alle modalità di gestione dell'evento decise dal centro operativo.

Il modulo è basato sul trattamento statistico (mediante la tecnica dei filtri di Kalman) degli scostamenti tra i dati misurati e simulati, e sulla applicazione dei correttivi necessari per la corretta riproduzione dell'idrogramma misurato.

### *Calibrazione*

La calibrazione del modello idrodinamico sarà sviluppata in due fasi:

- taratura delle scabrezze e delle perdite di carico localizzate (strutture) sulla base dei dati di monitoraggio disponibili (scale di deflusso delle stazioni di misura, idrogrammi registrati e relativi tempi di traslazione lungo l'asta, eventuali profili di piena rilevati);
- calibrazione del modello complessivo idrologico-idraulico.

Questa seconda fase, necessaria per supportare la taratura del modello afflussi-deflussi con gli elementi relativi alla traslazione idrodinamica delle portate nelle aste (fino alle stazioni di monitoraggio utilizzate per la calibrazione), sarà sviluppata in base ai criteri principali sotto evidenziati.

- Valorizzazione della fisicità della modellistica utilizzata;
- attenta presa in conto delle prerogative analogiche e di continuità temporale della modellistica utilizzata;
- esplicita differenziazione della calibrazione in fasi: ambito di input/output (pioggia/neve, incidenza regolazioni, incidenza prelievi, ...), componenti funzionali del regime di portata e del campo idrodinamico (bilanci stagionali, laminazione,...);
- selezione di un preciso periodo di calibrazione di riferimento (durata 1÷3 anni, indicativamente), adeguatamente rappresentativo ai fini della messa a punto del dispositivo di simulazione e del successivo processo di controllo e revisione;
- mantenimento dei valori dei parametri di taratura nel campo di verosimiglianza, definito in base all'esperienza, ai dati di letteratura e dei manuali d'uso, alla rapportabilità al significato fisico espresso.

Raggiunto il livello di messa a punto ottimale, si procederà a una caratterizzazione della performance attraverso indicatori di calcolo e visualizzazioni, corredando l'analisi con valutazioni circa le potenzialità di miglioramento perseguibili attraverso l'infitimento delle schematizzazioni sui dati georiferiti e/o il miglioramento dell'input pluvio-termometrico e idrometrico.

Gli indicatori di risposta del modello complessivo alla procedura di calibrazione saranno in prima analisi assunti tra gli stessi che il modulo MIKE View del MIKE11 (modulo che gestisce l'analisi e la rappresentazione dei risultati delle simulazioni numeriche condotte) utilizza per valutare la stima degli errori (intesi come differenza fra la serie storica misurata e quella simulata).

Si tratta principalmente degli indici sotto riportati.

Coefficiente di correlazione: 
$$\frac{\text{COV}(Q_o, Q_s)}{\sigma_{Q_o} \cdot \sigma_{Q_s}}$$

Errore di portata di picco: 
$$\frac{Q_{op} - Q_{sp}}{Q_{sp}}$$

Errore di forma tipo 1: 
$$\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n \left\{ \frac{Q_{o,i} - Q_{s,i}}{Q_{op}} \right\}^2$$

Errore di forma tipo 2: 
$$\frac{1}{n} \cdot \sum_1^n \left\{ \frac{Q_{o,i} - Q_{s,i}}{Q_{o,i}} \right\}^2$$

Errore di volume:

$$\frac{\sum_{i=1}^n |Q_{o,i} - Q_{s,i}|}{\sum_{i=1}^n Q_{o,i}}$$

Errore di tempo di picco:  $T_{op} - T_{sp}$  (espresso in giorni)

essendo:

$Q_{OP}$  la portata di picco osservata;

$Q_{SP}$  la portata di picco simulata;

$Q_{o,i}$  il valore osservato al tempo  $i$ ;

$Q_{s,i}$  il valore simulato al tempo  $i$ ;

$T_{OP}$  il tempo di picco osservato;

$T_{SP}$  il tempo di picco simulato;

$n$  il numero dei passi di tempo.

In funzione dei risultati ottenuti saranno studiati eventuali ulteriori indicatori specifici, finalizzati anche a supportare le future fasi di affinamento della calibrazione dei modelli.

### **Il modello idrodinamico HEC-RAS**

Il codice di calcolo HEC-RAS è sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

#### *Le equazioni del moto*

HEC-RAS risolve le equazioni di De Saint Venant distinguendo tra alveo e zone golenali.

Equazione di continuità

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

dove

$x$  distanza lungo il canale;

$t$  tempo;

$Q$  portata;

$A$  area della sezione;

$S$  area della sezione considerata contribuente al deflusso (ineffective flow area escluse);

$q_l$  flusso laterale per unità di lunghezza.

L'equazione può essere scritta per l'alveo inciso, per la golenale destra e per la golenale sinistra, di seguito, per semplicità, si riportano le equazioni per l'alveo inciso e per le golene complessivamente:

$$\frac{\partial A_a}{\partial t} + \frac{\partial Q_a}{\partial x_a} - q_g = 0$$

$$\frac{\partial A_g}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q_g}{\partial x_g} = q_a + q_l$$

Dove la sottoscrizione a e g indica alveo inciso e golene rispettivamente,  $q_c$  e  $q_g$  indicano gli scambi di portata tra l'alveo inciso e le zone golenali.

Si noti come siano considerate distanze diverse lungo l'alveo inciso e le zone golenali.

Equazione dell'energia

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S \right) = 0$$

dove:

$g$  accelerazione di gravità;

$S$  perdite di energia dovuta alla scabrezza;

$V$  velocità.

Anche in questo caso possiamo scrivere l'equazione per l'alveo inciso e per le golene:

$$\frac{\partial Q_a}{\partial t} + \frac{\partial(V_a Q_a)}{\partial x_a} + gA_a \left( \frac{\partial z}{\partial x_a} + S_a \right) = M_g$$

$$\frac{\partial Q_g}{\partial t} + \frac{\partial(V_g Q_g)}{\partial x_g} + gA_g \left( \frac{\partial z}{\partial x_g} + S_g \right) = M_a$$

Dove  $M$  rappresenta lo scambio di quantità di moto tra alveo inciso e golene, si noti che  $\Delta x_a M_a = -\Delta x_g M_g$ . Nelle equazioni  $z$  (livello d'acqua) non è sottoscritto, infatti un modello monodimensionale ha come assunzione implicita che il livello è costante all'interno dell'intera sezione. La velocità è invece diversa tra alveo inciso e zone golenali, per cui si avrebbe un valore dell'energia diverso, non possibile in un modello monodimensionale. Il valore dell'energia viene calcolato introducendo il valore  $a$ . Considerando una velocità media nella sezione e differenziando tra alveo, golena destra e golena sinistra, facendo una media pesata sulle portate, possiamo scrivere:

$$\alpha \frac{\bar{V}}{2g} = \frac{Q_{gsx} \frac{V_{gsx}^2}{2g} + Q_a \frac{V_a^2}{2g} + Q_{gdx} \frac{V_{gdx}^2}{2g}}{Q_{gsx} + Q_a + Q_{gdx}}$$

assumendo che la pendenza della linea dell'energia è unica risulta anche:

$$Q_{gsx} = \frac{Q_{Tot}}{K_{Tot}} K_{gsx} \quad Q_a = \frac{Q_{Tot}}{K_{Tot}} K_a \quad Q_{gdx} = \frac{Q_{Tot}}{K_{Tot}} K_{gdx}$$

dove  $K$  rappresenta la conveyance o conduttività idraulica. Inserendo quest'ultime nell'equazione precedente si ottiene:



$$\alpha = \frac{A_{Tot}^2 \left[ \frac{K_{gss}^3}{A_{gss}^2} + \frac{K_a^3}{A_a^2} + \frac{K_{gdx}^3}{A_{gdx}^2} \right]}{K_{Tot}^3}$$

#### *Definizione delle perdite di carico per attrito*

HEC-RAS utilizza l'equazione di Manning per la definizione delle perdite per attrito:

$$Q = \frac{AR_H^{2/3} \sqrt{S}}{n}$$

dove  $n$  è il coefficiente di scabrezza secondo tale formulazione. HEC-RAS distingue sempre tra alveo inciso e zone golenali calcolando separatamente la conveyance di queste zone. Nel caso in cui all'interno di tali zone vi siano variazioni di scabrezza suddivide ulteriormente la sezione calcolando la conveyance per ogni tratto a partire da area e contorno bagnato. Con tale procedura si trascura lo scambio di quantità di moto attraverso le linee di separazione, ipotesi generalmente accettabile. Nel caso di imposizione di scabrezze diverse all'interno dell'alveo tale assunzione può risultare non accettabile. In presenza di sponde fortemente vegetate rispetto all'alveo la procedura normalmente utilizzata fa sì che la parte centrale dell'alveo non risenta della presenza della vegetazione sulle sponde (le linee di separazione sono considerate senza attrito). Per questo motivo nel caso dell'alveo HEC-RAS verifica se la pendenza dei tratti in cui avviene la variazione di scabrezza è maggiore di 5:1, in questo caso non suddivide l'alveo, ma calcola un valore di scabrezza complessivo per l'alveo con la formula:

$$n_c = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N P_i n_i^{3/2}}{P} \right]^{2/3}$$

dove:

- $n_c$      valore di scabrezza complessivo;
- $P$         contorno bagnato complessivo;
- $P_i$       contorno bagnato del tratto  $i$ ;
- $n_i$       valore di scabrezza del tratto  $i$ .

Nei risultati HEC-RAS riporta la scabrezza media utilizzata per le golene e per l'alveo, sia che siano calcolate con il classico metodo della suddivisione che nel caso, per l'alveo, sia calcolato un valore complessivo.

La scabrezza, oltre che lungo la sezione, può essere variata anche con il livello o la portata.



Oltre alle perdite di carico per attrito HEC-RAS considera anche le perdite di carico per allargamento o restringimento della sezione:

$$h_e = C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove c è il coefficiente di contrazione.

### *Proprietà opzionali delle sezioni*

Nelle sezioni oltre alla definizione della scabrezza, dei coefficienti contrazione e delle diverse distanze lungo l'alveo e le golene, possono essere definite altre due caratteristiche che possono aumentare la rappresentatività del modello:

- ineffective flow area;
- blocked obstruction.

Le ineffective flow area definiscono parti della sezione in cui si ha accumulo d'acqua, ma che non contribuiscono al deflusso. Sono solitamente utilizzate per la definizione dei restringimenti dovuti alle strutture, quando si vogliano definire più sezioni nel tratto influenzato dalla struttura. Sono comunque molteplici le situazioni in cui l'utilizzo delle ineffective flow area permette una più accurata schematizzazione della realtà. Numericamente viene tolta l'area nell'equazione dell'energia, ma non in quella di continuità, e non viene aumentato il perimetro bagnato.

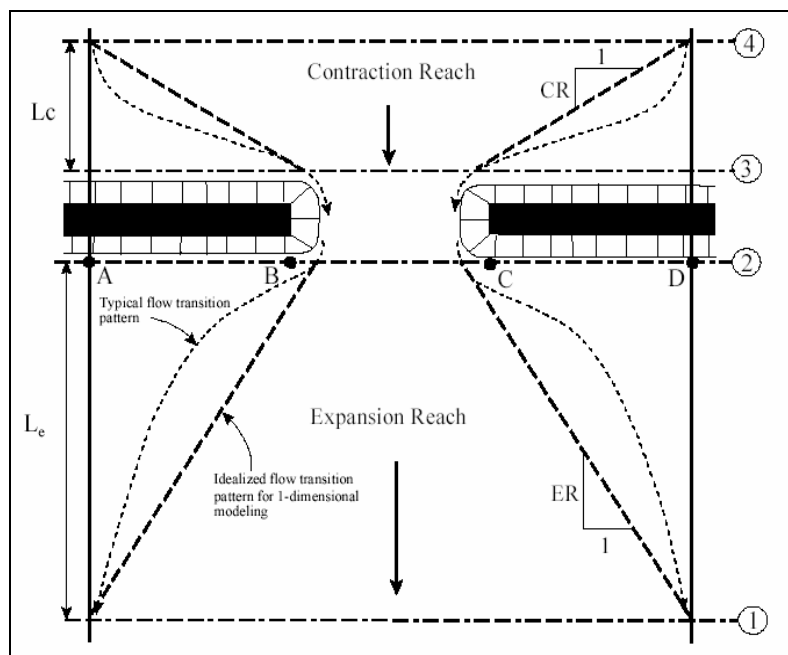
Le blocked obstruction sono utilizzate per la schematizzazione di ostacoli (generalmente edifici) all'interno della sezione. Numericamente viene eliminata l'area occupata (sia nell'equazione di continuità che in quella dell'energia) e viene aggiunto perimetro bagnato per la parte interessata dai livelli.

### *Strutture*

In HEC-RAS possono essere schematizzate diversi tipi di strutture, sia trasversali al corso d'acqua che parallele allo stesso.

Per le strutture trasversali la valutazione delle perdite di carico dovute alla presenza della struttura è fatta mediante la schematizzazione con 4 sezioni del tratto in cui avviene la contrazione e l'espansione della vena liquida, così come rappresentato nella figura successiva. Il manuale di HEC-RAS riporta anche diverse formulazioni per la valutazione di un corretto posizionamento delle sezioni 1 e 4. Nel caso in cui si vogliano utilizzare più

sezioni per la definizione dei 2 tratti, per la corretta definizione della parte di sezione contribuyente al deflusso si devono usare le ineffective flow area.



Posizionamento delle sezioni per l'analisi dei tratti di contrazione ed espansione dovuto alle strutture.

## Ponti

Il codice di calcolo permette l'utilizzo di 4 formulazioni per il calcolo del rigurgito provocato dai ponti:

- bilancio energetico;
- teorema della quantità di moto;
- Yarnell;
- Metodo WSPRO.

Con il metodo del bilancio energetico sono definite 2 sezioni aggiuntive all'interno del ponte sottraendo l'area occupata dalla struttura e la soluzione viene ottenuta considerando queste 2 sezioni come normali sezioni di calcolo.

Anche con il metodo della quantità di moto vengono inserite 2 sezioni aggiuntive all'interno del ponte ed è applicato il teorema della quantità di moto ai tre volumi di controllo: 2-sezione di valle del ponte, sezione di valle del ponte – sezione di monte del ponte e sezione di monte del ponte-3. In quest'ultimo considera anche la forza di reazione alla spinta idrodinamica esercitata dalla corrente. Tale forza dipende solo dalla forma della pila per  $Fr < 0.7$ . Al modello viene fornito il valore di  $C_D$  (Drag coefficient) tabellato per diverse forme di pile.

Il metodo di Yarnell deriva da indagini sperimentali. La formula che consente di calcolare il sopralzo del pelo libero nella sezione 3 rispetto a quello della sezione 2 prodotto da una pila. La forma della pila è inserita mediante il coefficiente di forma  $K$ .

Il metodo WSPRO è quello utilizzato dal programma omonimo della FHWA (Federal Highway Administration). In sostanza è applicato il bilancio energetico nei tronchi 1-2, 2-3 e 3-4, usando espressioni delle perdite di carico che tengono conto di alcuni risultati sperimentali.

La scelta del metodo da utilizzare dipende dalle caratteristiche del ponte: nel caso in cui il rigurgito sia dovuto prevalentemente alla presenza delle pile è preferibile utilizzare il metodo di Yarnell o quello della quantità di moto in cui è possibile definire un coefficiente legato alla forma della pila; nel caso di forti restringimenti provocati dalla presenza del ponte è preferibile il metodo WSPRO sviluppato appositamente per questi casi.

Nel caso in cui il livello d'acqua raggiunga o superi l'intradosso del ponte i metodi sopra citati, ad esclusione di quello dell'energia, non sono più validi. In questo caso o si utilizza l'equazione dell'energia o è possibile utilizzare le formulazioni per deflusso a battente, libero o rigurgitato, e, se il livello supera l'estradosso, la formula del deflusso a stramazzo.

### *Tombini*

Si possono considerare diverse forme di tombini come pure combinazioni di esse. Nel calcolo il programma distingue diverse situazioni: deflusso controllato dalla sezione di ingresso, deflusso controllato dalla sezione di uscita, deflusso in pressione.

Per la determinazione della situazione del controllo in ingresso, che dipende solamente dalla geometria dell'imbocco del tombino, sono utilizzate le equazioni ottenute da vari enti americani e pubblicate in "Hydraulic Design of Highway Culverts" [FHWA, 1985].

### *Stramazzi*

Il calcolo del deflusso attraverso gli stramazzi è fatta con le formule degli stramazzi. Si possono considerare sia stramazzi in parete sottile che in parete grossa, liberi o controllati da paratoie verticali o radiali. È possibile inoltre considerare la rottura della struttura per sormonto o per sifonamento.

### Stramazzi laterali

Oltre alle strutture trasversali alla corrente è possibile considerare delle strutture parallele alla corrente che simulano lo sfioro dell'acqua al di sopra di un argine o di una apposita struttura di sfioro laterale. In HEC-RAS il calcolo della portata sfiorante non è fatta considerando unicamente il livello di una sezione, ma considerando la variazione di livello sia dello stramazzo che del livello d'acqua, permettendo una più precisa valutazione.

L'equazione fondamentale di sfioro:

$$Q = CLH^{3/2}$$

deve rendere conto di tale situazione. Nella figura successiva sono evidenziate le equazioni delle rette che identificano le pendenze della struttura laterale e del pelo libero tra due sezioni di calcolo: le costanti  $a_{ws}$  e  $a_w$  rappresentano le pendenze, mentre  $C_{ws}$  e  $C_w$  indicano le altezze iniziali (il pedice ws sta per water surface, mentre il pedice w sta per weir).

Dall'equazione classica relativa allo sfioro si ricava:

$$dQ = C(y_{ws} - y_w)^{3/2} dx$$

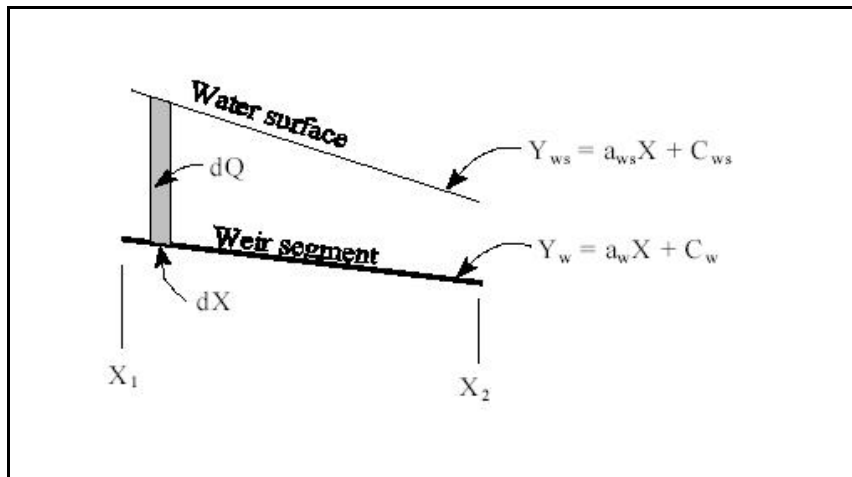
$$dQ = C(a_{ws}x + C_{ws} - a_w - C_w)^{3/2} dx$$

$$dQ = C(a_1x + C_1)^{3/2} dx$$

con  $a_1 = a_{ws} - a_w$  e  $C_1 = C_{ws} - C_w$ . Integrando:

$$\int_{x_1}^{x_2} dQ = C \int_{x_1}^{x_2} (a_1x + C_1)^{3/2}$$
$$Q_{x_1-x_2} = \frac{2C}{5a_1} \left[ (a_1x_2 + C_1)^{5/2} - (a_1x_1 + C_1)^{5/2} \right]$$

Questa equazione è valida per  $a_1$  diverso da zero; quando è pari a zero si ritorna al caso in cui il pelo libero parallelo alla superficie di sfioro.



Pendenza della struttura laterale e del profilo idrico.

All'interno degli stramazzi laterali possono essere inseriti tombini e paratoie. Si può prevedere inoltre il collasso della struttura per sormonto o sifonamento.

### *Storage Area*

Nelle aree in cui è prevalente l'accumulo d'acqua rispetto al suo deflusso, sono schematizzate mediante Storage Area. In tali elementi HEC-RAS risolve unicamente l'equazione di continuità. La descrizione delle Storage Area è fatta mediante la curva quota-volume del territorio rappresentato. Le Storage Area sono collegate alle sezioni mediante stramazzi laterali e possono essere collegate tra loro mediante stramazzi.

### **Il modello idrodinamico PAB**

Il modello idraulico di propagazione di piena proposto è basato sul metodo PAB (Todini e Bossi, 1986).

Tale metodo, particolarmente adatto ad applicazioni on-line, ha la caratteristica di :

- essere incondizionatamente stabile;
- avere ridotti tempi di calcolo;

poter essere integrato con passi di tempo relativamente lunghi senza perdere eccessivamente in precisione.

Il metodo è basato sulla successiva applicazione di profili di rigurgito (calcolo dei livelli da valle verso monte in corrente lenta) e di propagazioni di portata mediante risposta impulsiva di tipo parabolico (trasferimento di portata da monte verso valle).

Il modello si basa sulle ben note equazioni di De Saint Venant sotto l'ipotesi di poter trascurare i termini inerziali. In sintesi lo schema di calcolo del PAB è il seguente:

- 1) Definizione, al tempo  $t=0$ , del valore della portata in tutte le sezioni trasversali utilizzate per descrivere la geometria del corso d'acqua.
- 2) Calcolo del livello di valle, sulla base ad esempio della scala di deflusso, e ricostruzione del profilo di moto permanente con la portata variabile con l'ascissa spaziale  $x$ .
- 3) Calcolo dei valori medi dei coefficienti di celerità e diffusività stimati nelle sezioni comprese fra le sezioni di riferimento utilizzate per la propagazione delle portate.
- 4) Propagazione a valle della portata in ingresso a monte, appoggiandosi alle sezioni di riferimento prescelte.

5) Incremento del passo temporale e ripetizione della procedura partendo dal punto 2.

E' interessante notare come lo schema PAB, adesso descritto, consenta di separare la propagazione della portata dalla propagazione dei livelli.

Infatti questa separazione rende possibile propagare la portata su un sottoinsieme di sezioni trasversali, dette di riferimento, mentre i livelli risultano calcolati in tutte le sezioni trasversali di descrizione geometrica.

Infine, la portata ad ogni passo temporale relativa a tutte le sezioni di descrizione geometrica viene calcolata sulla base dell'ipotesi di variazione lineare del valore della portata presente nelle sezioni di riferimento.

Le equazioni che reggono la propagazione monodimensionale di un'onda di piena in un tronco fluviale, note come equazioni di De Saint Venant, in assenza di efflussi o di apporti laterali distribuiti lungo l'alveo possono scriversi:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{g} \left[ \frac{Q}{A} \frac{\partial(Q/A)}{\partial x} + \frac{\partial(Q/A)}{\partial t} \right] + J = 0 \end{cases} \quad (1)$$

dove:

- Q: portata;
- A: area della sezione bagnata;
- z: quota del pelo liquido rispetto ad un piano orizzontale;
- R: raggio idraulico;
- x: ascissa corrente lungo l'asse del corso d'acqua;
- t: coordinata temporale;
- J: perdita distribuita, per unità di peso e per unità di lunghezza, dovuta alle resistenze al contorno ed esprimibile secondo Manning come:

$$J = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}}$$

- n: coefficiente di scabrezza secondo Manning.

Nella maggior parte delle applicazioni pratiche, per lo studio della propagazione di piena nei corsi d'acqua naturali, i termini inerziali, risultano di un ordine inferiore ai termini di perdita di attrito e di pendenza del profilo liquido e per di più di segno opposto. In realtà ciò non è del tutto vero in alcuni problemi particolari dove anche la pendenza relativa alle perdite per attrito è molto modesta e dello stesso ordine dei termini inerziali, come ad esempio avviene nei casi di estuari sotto l'influenza della marea.

Più in generale, nell'ipotesi che i termini inerziali siano trascurabili, il sistema di equazioni diviene:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial z}{\partial x} = -J \end{cases} \quad (2)$$

e può essere ridotto nella forma di una equazione di tipo parabolico nella sola portata:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - C \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (3)$$

dove:

$$D = \frac{Q}{2JB} \quad C = \frac{Q}{A} \left( 1 + \frac{3}{2} \frac{A}{BR} \frac{\partial R}{\partial z} \right) + \frac{D}{B} \frac{\partial B}{\partial x} \quad (4) \text{ e } (5)$$

essendo:

- D: il coefficiente di diffusività;
- C: il coefficiente di convettività;
- B: la larghezza in superficie.

L'equazione (3) è una equazione differenziale del secondo ordine di tipo quasi lineare. Da un punto di vista analitico risulta comodo considerare i coefficienti C e D costanti in modo da trasformare l'equazione (3) in un'equazione diffusiva-convettiva di tipo lineare, linearizzando l'equazione attorno allo stato presente del corso d'acqua assunto costante nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  ed aggiornando lo stato ad ogni nuovo passo di tempo in modo da descrivere la loro variabilità temporale.

Il fatto che l'equazione (3) sia adesso di tipo lineare rende possibile l'applicazione del principio di sovrapposizione degli effetti. In sostanza è possibile individuare la soluzione dell'equazione (3) relativa ad un impulso e quindi esprimere ogni altra soluzione mediante l'integrale di convoluzione. In riferimento al presente problema, le condizioni al contorno imposte risultano:

$$\begin{array}{llll} \text{I)} & Q(0,t) & = \delta(t) & t > 0 \quad \{ \text{dove } \delta(t) \text{ è il delta di Dirac} \} \\ \text{II)} & Q(x,t) & = 0 & x \rightarrow +\infty \\ \text{III)} & Q(x,0) & = 0 & \end{array} \quad (6)$$

La condizione (I) indica che l'onda in ingresso nel tratto in esame è rappresentata da un Delta di Dirac. La condizione (II) dice che la perturbazione di portata si annulla procedendo verso valle ad una distanza sufficientemente grande. La condizione (III) risulta coerente con l'ipotesi di linearità accettata ed esprime il fatto che la perturbazione si sovrappone al preesistente stato di deflusso senza interferire con esso.

La soluzione dell'equazione (3) sulla base delle condizioni al contorno (6), considerando  $C>0$  e  $D>0$  (Hayami, 1951), (Dooqe, 1973), (Todini e Bossi, 1986) risulta:

$$U_{\Delta x} = \frac{\Delta x}{\sqrt{4\pi Dt^3}} e^{-\frac{(\Delta x - Ct)^2}{4Dt}} \quad (7)$$

essendo  $\Delta x$  la distanza fra la sezione considerata e la sezione più a monte in cui si manifesta una variazione di portata.

Pertanto, per una qualsiasi variazione di portata a monte, ferme restando le altre condizioni al contorno, la soluzione dell'equazione (3) si ottiene attraverso l'integrale di convoluzione:

$$Q(x + \Delta x, t) = \int_0^t Q(x, t - \gamma) u_{\Delta x}(\gamma) d\gamma \quad (8)$$

Nelle applicazioni pratiche l'equazione (8) viene utilizzata in forma discretizzata. Ciò vuol dire che all'integrale si sostituisce una sommatoria, la funzione  $Q(x, t)$  viene campionata con passo  $\Delta t$ , ed infine  $u_{\Delta x}(t)$ , che rappresenta la risposta impulsiva del sistema, viene sostituita dalla forma discretizzata dell'idrogramma unitario relativo ad un impulso quadro di durata  $\Delta t$ .

Per il calcolo di quest'ultimo si procede nel seguente modo. Si osservi, innanzi tutto, che la risposta in forma continua ad un impulso quadro di durata  $\Delta t$  risulta:

$$U_{\Delta x}(t) = \frac{F(t) - F(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (9)$$

in cui:

$$F(t) = \int_0^t u_{\Delta x}(\gamma) d\gamma = N\left(-\frac{\Delta x - Ct}{\sqrt{2Dt}}\right) + e^{\frac{\Delta x C}{D}} N\left(-\frac{\Delta x + Ct}{\sqrt{2Dt}}\right) \quad (10)$$

dove:

$$N(\bullet) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\theta^2}{2}} d\theta$$

Pertanto la sua forma discretizzata, ovvero il valore medio integrale di  $U_{\Delta x}$  nell'intervallo di tempo compreso fra  $t$  e  $t + \Delta t$  risulta:

$$\bar{U}_{\Delta x}(i) = \bar{U}_{\Delta x}(t \leftrightarrow t + \Delta t) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U_{\Delta x}(\gamma) d\gamma = \frac{1}{\Delta t} [IU(t + \Delta t) - IU(t)] \quad (11)$$

essendo:

$$IU(t) = \int_t^t U_{\Delta x}(\gamma) d\gamma$$

Infine sostituendo l'equazione (9) nella (11) si ottiene:

$$\bar{U}_{\Delta x}(t \leftrightarrow t + \Delta t) = \frac{1}{\Delta t^2} [IF(t + \Delta t) - 2IF(t) + IF(t - \Delta t)] \quad (12)$$

in cui:



$$IF(t) = \int_0^t F(\gamma) d\gamma = \frac{1}{C} \left[ (Ct - \Delta x) N\left(-\frac{\Delta x - Ct}{\sqrt{2Dt}}\right) + (Ct + \Delta x) e^{\frac{\Delta x C}{D}} N\left(-\frac{\Delta x + Ct}{\sqrt{2Dt}}\right) \right]$$

In conclusione l'equazione (8) in forma discretizzata risulta:

$$Q(x + \Delta x, k) = \sum_{i=1}^r Q(x, k - i + 1) \bar{U}_{\Delta x}(i) \quad (13)$$

dove  $r$  indica le unità di memoria del sistema idraulico.

Come premesso, questa equazione risulta valida purché  $U_{\Delta x}(i)$  non vari nel tempo, ovvero  $C$  e  $D$  siano invarianti nel tempo. Qualora si voglia tenere conto della loro variabilità ad ogni passo temporale si avranno successive risposte  $U_{\Delta x}(i)$  per  $i$  diversi intervalli di tempo  $k$  e l'equazione (13) diventa:

$$Q(x + \Delta x, k) = \sum_{i=1}^r Q(x, k - i + 1) \bar{U}_{\Delta x, k}(i) \quad (14)$$

In sostanza, al fine di risolvere il problema non lineare del moto vario (ovvero determinare le funzioni  $Q(x, t)$  e  $z(x, t)$ ), l'idea base del modello PAB è quella di associare all'equazione (14) un profilo di moto permanente (ricostruito per correnti lente da valle verso monte nell'ipotesi di portata variabile con  $x$ ) attorno al quale l'equazione (3) possa essere linearizzata ad ogni  $\Delta t$  al fine di aggiornare i valori dei coefficienti  $C$  e  $D$  che verranno quindi considerati costanti durante il successivo passo temporale.

### *Il profilo di moto permanente*

Si consideri l'equazione dinamica del moto gradualmente variato, dedotta dall'applicazione del teorema della quantità di moto (Marchi e Rubatta, 1981):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( z_f + \frac{p}{\gamma} + \frac{\beta Q^2}{2gA^2} \right) = -\frac{\tau}{\gamma R} \quad (15)$$

dove:

- $z_f$  : quota del fondo della sezione corrente;
- $p$  : pressione idrostatica sul fondo della sezione;
- $\gamma$  : peso specifico dell'acqua;
- $Q$  : portata defluente;
- $A$  : area bagnata;

- $\beta$  : coefficiente di ragguglio della quantità di moto definito come:  $\beta = \frac{\int v^2 dA}{Q^2 / A}$

essendo

- $v$  : la velocità della corrente che attraversa l'area elementare  $dA$ ;
- $\tau$  : sforzo tangenziale agente sulla superficie bagnata di contorno  $C$ ;
- $R$  :  $A/C$ : raggio idraulico;
- $C$  : contorno bagnato;
- $x$  : ascissa corrente;

Il termine connesso alle azioni di resistenza al moto per attrito può essere espresso (Manning):

$$\frac{\tau}{\gamma R} = J = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^3} \quad (16)$$

Si può inoltre scrivere:

$$Q = \frac{R^{\frac{2}{3}} A J^{\frac{1}{2}}}{n} = K \sqrt{J} \quad (17)$$

dove K rappresenta la conduttanza idraulica.

Risulta pertanto:

$$J = \frac{Q^2}{K^2}$$

E posto inoltre:  $y = \frac{p}{\gamma}$

dove y rappresenta la profondità della corrente rispetto al fondo si può scrivere:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( z_f + y + \frac{\beta Q^2}{2gA^2} \right) = -\frac{Q^2}{K^2} \quad (18)$$

La ricostruzione del profilo di moto permanente in condizione di corrente lenta implica la soluzione dell'equazione differenziale (18) sulla base delle condizioni al contorno rappresentate dalla funzione Q(x), dal livello liquido nella sezione più a valle e dalla conoscenza delle caratteristiche geometriche.

L'integrazione della (18) nel caso di un corso d'acqua naturale può avvenire solo per via numerica.

Ne segue pertanto che il modello di moto permanente viene ad essere rappresentato dalla seguente equazione:

$$z_{f2} + y_2 + \beta_2 \frac{Q_2^2}{2gA_2^2} = z_{f1} + y_1 + \beta_1 \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} + \int_{x_1}^{x_2} J(x) dx \quad (19)$$

dove i pedici 1 e 2 indicano rispettivamente la sezione a valle e la sezione a monte.

Le sezioni trasversali di un alveo naturale sono, in genere, alquanto irregolari; in particolare presentano una marcata distinzione tra alveo inciso e zona golenale.

In queste condizioni rappresentare la corrente attraverso i soli valori dell'area e del contorno bagnato complessivi, della velocità media e di un unico valore di coefficiente di scabrezza, può portare a risultati non sufficientemente attendibili.

Nel caso quindi di correnti fondamentalmente monodimensionali, ma trasversalmente non omogenee, quali quelle in oggetto, è opportuno considerare la generica sezione trasversale come sezione composita.

### *L'integrazione dell'equazione del moto permanente*

Si ipotizzi di disporre per ciascuna sezione trasversale una tabella contenente la quota di fondo della sezione ed inoltre i valori di  $A$ ,  $K$ ,  $\beta$  e  $Q_c$ , essendo  $Q_c$  la portata critica, relativi a valori della profondità  $y$  scanditi con regolarità (ad es. 20cm) da 0 fino ad un valore massimo legato alla quota della sommità delle sponde.

La quantità  $Q_c$  è stata inserita nella tabella al fine di eseguire il controllo che la soluzione cercata sia effettivamente in corrente lenta ( $Q < Q_c$ ).

Considerando nuovamente la (19) si ipotizzi che la funzione d'attrito  $J(x)$ , sia esprimibile in forma lineare, cioè:

$$\int_{x_1}^{x_2} J(x) dx = \frac{J_1 + J_2}{2} \Delta x \quad (20)$$

dove  
risulta:

$$\Delta x = x_2 - x_1.$$

$$\text{Inoltre posto: } z = z_f + y$$

$$z_2 + \beta_2 \frac{Q_2^2}{2gA_2^2} - J_2 \frac{\Delta x}{2} = z_1 + \beta_1 \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} - J_1 \frac{\Delta x}{2} \quad (21)$$

In riferimento al generico passo di integrazione, il membro a destra dell'equazione (21) risulta completamente noto, mentre il membro a sinistra presenta come incognita  $z_2$ , essendo  $A_2$  e  $J_2$  esprimibili in funzione di  $z_2$ . La ricerca di  $z_2$  consiste quindi nella ricerca dello zero della funzione:

$$f(z_2) = z_2 + \beta_2 \frac{Q_2^2}{2gA_2^2} - J_2 \frac{\Delta x}{2} - F_1 \quad (22)$$

dove:

$$F_1 = z_1 + \beta_1 \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} + J_1 \frac{\Delta x}{2}$$

La ricerca dello zero della funzione (22), viene effettuata mediante il metodo dicotomico, in quanto si dispone di due valori di partenza di  $z_2$  all'interno dei quali si trova sicuramente la soluzione in corrente lenta.

Il primo deriva dall'ipotesi che nella sezione di monte la portata  $Q_2$  defluisca in condizioni critiche; ne segue che:

$$F_2 = z_2 + \beta_2 \frac{Q_2^2}{2gA_2^2}$$

assume il valore minimo possibile nel campo delle correnti lente mentre  $J_2$  assume il valore massimo possibile.

Si possono avere i seguenti due casi:

$$F_2 \geq F_1 + J_2 \frac{\Delta x}{2} \quad (a)$$

$$F_2 < F_1 + J_2 \frac{\Delta x}{2} \quad (b)$$

Il caso (a) indica che non vi è soluzione in corrente lenta e che pertanto la soluzione si trova in corrente critica o in corrente supercritica.

Tale circostanza, in un corso d'acqua a regime fluviale, si manifesta solo localmente e in genere per grandi valori di portata, mentre il regime medio di deflusso è di tipo subcritico. Si ammette, allora, di compiere una approssimazione locale e si pone sempre, nel caso (a), che il deflusso avvenga in condizioni critiche.

Nel secondo caso, quando esiste una soluzione dell'equazione (19) in condizioni di corrente lenta, i valori di partenza di  $z_2$  per l'applicazione del metodo dicotomico vengono così definiti.

$$z_{2inf} = z_{c2}$$

$$z_{2sup} = F_1 + J_{c2} \frac{\Delta x}{2}$$

dove  $z_{c2}$  e  $J_{c2}$  sono relativi alle condizioni critiche nella sezione di monte.

Si osservi che la soluzione  $z_2$  in corrente lenta sarà sicuramente maggiore di  $z_{inf}$  e sicuramente minore di  $z_{sup}$ .

Il metodo dicotomico viene quindi applicato nel seguente modo tenendo presente che :

$$z_{2inf} = z_{c2}$$

$$z_{2sup} = F_1 + J_{c2} \frac{\Delta x}{2}$$

Si ponga allora la soluzione di primo tentativo pari a:

$$z_2^2 = \frac{z_{2inf} + z_{2sup}}{2}$$

$$f(z_2^i) > 0$$

$$z_{2sup} = z_2^1$$

$$y_2^i = z_2^i - z_{f2}$$

$$z_2 = z_{2inf} + (z_{2sup} - z_{2inf}) \frac{f(z_{2inf})}{f(z_{2inf}) + f(z_{2sup})}$$

se  $f(z_2^1) < 0$  si pone  $z_{2inf} = z_2^1$ , altrimenti se  $f(z_2^1) > 0$  si pone  $z_{2sup} = z_2^1$

e quindi si calcola la soluzione di secondo tentativo:

$$z_2^2 = \frac{z_{2inf} + z_{2sup}}{2}$$

In genere, si procede fino a quando  $f(z_2^i)$  si avvicina a zero con un'assegnata precisione.

Al fine di accelerare la procedura di calcolo, riducendo quindi i tempi di esecuzione del programma, vengono adottati i seguenti accorgimenti.

Innanzitutto ogni valore di tentativo  $y_2^i = z_2^i - z_{f2}$ , sicuramente non tabulato, viene approssimato tramite il valore  $y$  immediatamente inferiore o superiore, riportato in tabella.

In questo modo si evitano interpolazioni per il calcolo delle grandezze geometriche.

Si procede quindi con il metodo dicotomico, prima descritto, fino a quando  $z_{2inf}$  e  $z_{2sup}$  non risultano corrispondenti a due valori  $y_2$  successivi riportati in tabella.

A questo punto la  $z_2$  cercata la si ottiene come:

$$z_2 = z_{2inf} + (z_{2sup} - z_{2inf}) \frac{f(z_{2inf})}{f(z_{2inf}) + f(z_{2sup})}$$

Al programma di calcolo è stato aggiunto infine un algoritmo che, in prima approssimazione consente di tenere sotto controllo l'errore di integrazione del profilo di rigurgito infittendo automaticamente le sezioni trasversali quando risulti necessario.

Si parte dall'espressione lineare adottata per esprimere la pendenza della linea dei carichi nell'integrazione numerica dell'equazione (19):

$$\int_{x_1}^{x_2} J(x) dx = \frac{J_1 + J_2}{2} \Delta x \quad (23)$$

Con un semplice sviluppo in serie di Taylor della funzione  $J(x)$ , arrestato al termine del secondo ordine, e successiva integrazione tra le sezioni 1 e 2 distanti  $\Delta x$  è facile ottenere un'espressione approssimata per la variazione di carico in funzione di  $J(x)$ :

$$\Delta h \approx \frac{J_1 + J_2}{2} \Delta x + \frac{1}{12} \frac{\partial^2 J}{\partial x^2} \Delta x^3 \quad (24)$$

Il secondo termine a secondo membro della (24) rappresenta l'errore di integrazione che si commette risolvendo la (19) con l'ipotesi (23), errore che ovviamente, è legato al passo di calcolo, e va ad aggiungersi a quello dovuto alla incompleta descrizione geometrica dell'alveo tra le sezioni 1 e 2.

Questo errore è tanto più forte quanto più forte è la curvatura della funzione  $J(x)$  nel tratto considerato; situazione, questa che in genere accade a monte di una sezione in cui si realizza lo stato critico o vicino al critico.

Una espressione di questo errore ancor più approssimata della precedente ma più facilmente calcolabile è data da:

$$E = \left[ J^2 \frac{J - S_0}{(1 - F^2)^2} \right] \frac{\Delta x^3}{12} \quad (25)$$

dove  $S_0$  è la pendenza dell'alveo e  $F$  è il numero di Froude:

$$F = \sqrt{\frac{Q^2 B}{g A^3}}$$

La (25) può essere valutata in via approssimativa nella sezione di valle 1 in cui è noto lo stato idraulico e fornisce l'ordine di grandezza dell'errore commesso facendo un passo spaziale lungo  $\Delta x$  a partire dalla sezione 1.

Assegnato il valore massimo dell'errore ammesso è quindi possibile ricavare l'ordine di grandezza del passo spaziale massimo corrispondente  $\Delta x_0$ .

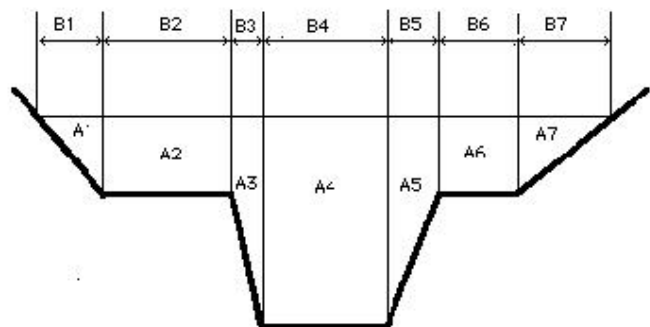
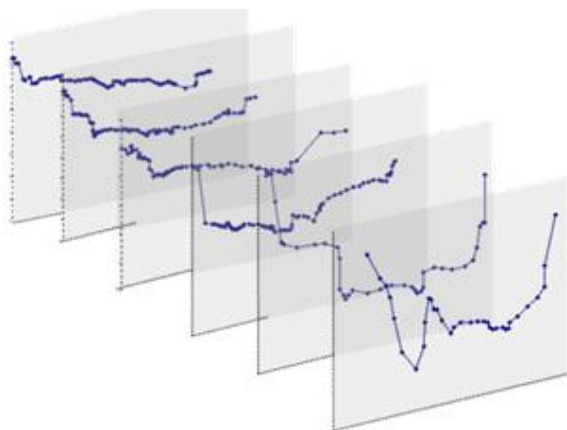
Nel caso in cui  $\Delta x_0$  è minore di  $x$  occorre introdurre una sezione di calcolo intermedia a quelle rilevate 1 e 2 le cui caratteristiche geometriche sono ottenute per interpolazione delle sezioni 1 e 2.

Ottenuta la soluzione nella sezione intermedia, si riparte da questa verso monte, ripetendo il procedimento con il metodo prima descritto.

#### *I parametri idraulici nel caso di sezioni composite*

La sezione trasversale di un corso d'acqua può essere composta da parecchie sottosezioni aventi ciascuna un differente valore del coefficiente di scabrezza. In questi casi, utilizzando ad esempio la formula di Manning, è possibile calcolare la velocità media in ciascuna sottosezione e, quindi, la portata ad essa corrispondente.

La portata totale è allora la somma delle portate corrispondenti alle varie sottosezioni, mentre la velocità media relativa all'intera sezione è pari al rapporto tra la portata totale e l'area totale.



**Schema di sezioni complesse con scomposizione in sottosezioni**

Poniamo  $v_1, \dots, v_n$  la velocità media nelle  $n$  sottosezioni; poniamo  $A_1, \dots, A_n$  l'area delle sottosezioni; poniamo  $K_1, \dots, K_n$  i coefficienti di conduttanza delle sottosezioni; ammettiamo, inoltre, che la pendenza della linea di carichi totali sia la stessa per tutte le sottosezioni. Risulta:

$$v_1 = \frac{K_1}{A_1} J^{\frac{1}{2}}, \dots, v_n = \frac{K_n}{A_n} J^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = VA = \sum_{i=1}^n v_i A_i = J^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^n k_i$$

Allora il coefficiente di conduttanza della sezione totale è:  $K = \sum_{i=1}^n k_i$

Il coefficiente  $\beta$  della sezione totale si ottiene poi, nell'ipotesi di velocità costante in ciascuna sottosezione, tramite la relazione:

$$\beta = \frac{\int v^2 dA}{Q^2 / A} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{k_i^2}{A_i}}{\frac{K^2}{A}}$$

I coefficienti  $C$  e  $D$  presenti nell'equazione (3) possono poi essere espressi in funzione della conduttanza  $K$  come:

$$D = \frac{K^2}{2QB} \quad C = \frac{D}{B} \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{Q}{KB} \frac{\partial K}{\partial z}$$

Infine per il calcolo della portata critica relativa ad un certo valore della profondità d'acqua, tenendo presente che nelle sottosezioni la distribuzione della velocità viene ipotizzata uniforme, risulta semplicemente:

$$Q_c = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{g A_i^3}{B_i}}$$

essendo  $B_i$  la larghezza in superficie dell' $i$ -esima sottosezione.

#### 4.2 I modelli di scenario

La catena di procedure e modelli di previsione potranno essere convenientemente impiegati al fine di ottenere scenari di simulazione utili nelle azioni di controllo e gestione degli eventi di piena relativi al bacino idrografico in esame. Ad esempio, la suddetta modellistica potrà essere impiegata per stimare la localizzazione delle aree a rischio, le entità di tale rischio e le entità dei fenomeni di possibile inondazione, in modo che sia possibile prefigurare, dimensionare e pianificare i possibili interventi da parte della

protezione civile. Gli strumenti messi a disposizione dovranno consentire di svolgere analisi modellistiche sui fenomeni che generano le inondazioni, partendo dalla scala di bacino per giungere alla scala locale nella valutazione dei possibili effetti.

Queste valutazioni potranno avvenire in modo preventivo, sulla base di considerazioni di tipo probabilistico per le precipitazioni, e di tutte le informazioni strutturali e di uso del territorio a scala regionale e locale e dei loro successivi aggiornamenti o affinamenti.

In particolare, il sistema consentirà:

- L'analisi della propagazione idraulica in alveo e l'individuazione dei tratti a rischio di esondazione. A tale scopo la modellistica sarà alimentata da onde di piena definite alle sezioni di ingresso (sezione di monte, immissioni, ed eventuali contributi distribuiti) fornendo una completa descrizione del moto in alveo definendo onde e profili longitudinali in termini di livello e portata. Le onde agli ingressi saranno quelle determinate con il sistema di simulazione idrologica. L'uso del sistema consentirà l'individuazione delle posizioni e delle entità delle possibili esondazioni per superamento arginale o di sponda.
- L'analisi idraulica del fenomeno di esondazione e della propagazione bidimensionale sui territori inondati. A tale scopo la modellistica sarà alimentata da onde di piena alle sezioni di ingresso e, simulando idraulicamente il fenomeno, fornirà una successione temporale di mappe che contengono i tiranti d'acqua e le relative velocità. Il sistema verrà utilizzato per la simulazione di eventi o l'analisi di ipotetici scenari idrologici. Al fine di ridurre i tempi di calcolo e le eventuali forti aleatorietà nella definizione degli schemi di simulazione, legate alla complessità del fenomeno, verranno impiegate opportune semplificazioni tali da rendere lo strumento adatto per un uso di simulazione in fase operativa. Si tratterà essenzialmente di uno strumento di simulazione che opererà a scala locale con un grado di dettaglio che è funzione delle informazioni di base utilizzate, quali modello digitale del terreno e linee di discontinuità altimetrica (break lines). In tal modo si potrà procedere alla valutazione delle pericolosità e del rischio idraulico nelle aree individuate come potenzialmente inondabili, basandosi su tecniche GIS per l'aggregazione e la caratterizzazione probabilistica degli effetti degli scenari ipotizzati e simulati con la sequenza modellistica. A tale scopo il sistema si avvalerà delle mappature degli elementi danneggiabili con relativa stima di presenze umane e di beni, oltre alla mappatura delle relative vulnerabilità. Per la quantificazione



di pericolosità e vulnerabilità si farà riferimento alle grandezze: tirante d'acqua, tempo di permanenza e predefinite soglie di valori che individuano classi con livello di pericolo crescente.

## 5 LE PREVISIONI DEI CENTRI FUNZIONALI REGIONALI

Come detto, il sistema di previsione delle piene fluviali utilizzerà in input le portate affluenti in Po derivanti dalle previsioni meteo-idrologiche messe a disposizione dai centri funzionali regionali e pertanto la catena operativa può essere schematizzata nelle seguenti attività:

1. modelli numerici globali per la previsione del tempo;
2. downscaling della precipitazione globale utilizzando modelli regionali per la previsione del tempo;
3. modelli idrologici ed idraulici per la trasformazione afflussi-deflussi e la propagazione della piena degli affluenti di Po;
4. modelli idraulici per la propagazione della piena nell'asta di Po;
5. modelli di inondazione fluviale del Po.

dove le attività di cui ai punti 1,2 e 3 sono assicurate dal centro funzionale territorialmente competente, o da suo delegato, mentre quelle di cui ai punti 4 e 5 sono in capo al Centro Operativo.

### *5.1 I bacini lombardi ed emiliani*

#### *5.1.1 Modelli meteorologici*

In molte situazioni l'estensione dell'intervallo di previsione desiderato risulta più lungo di quello che un evento di precipitazione impiega durante la trasformazione in deflusso e la propagazione in alveo. Pertanto, è necessario trovare funzioni alternative all'inizializzazione dei modelli idrologici di bacino oltre a quella delle precipitazioni osservate, in quanto il solo impiego dei valori osservati potrebbe non consentire un'adeguata pianificazione dell'emergenza. A tal riguardo occorre osservare che esistono molte azioni di gestione delle piene, quali ad esempio lo svuotamento dei grandi serbatoi, la dislocazione dei mezzi di emergenza e l'allerta del personale, in cui tempi di previsione maggiori di un giorno nei bacini più estesi potrebbero essere estremamente utili, anche se tali previsioni fossero solo probabilistiche nella loro natura piuttosto che deterministiche.

I modelli numerici per la previsione del tempo forniscono una soluzione potenziale a questo problema. Questi schemi risolvono una serie di equazioni differenziali parziali non lineari derivate dalle leggi fisiche valide per un'atmosfera tridimensionale con una parametrizzazione appropriata nella descrizione dei processi fisici di griglia minore. Per cominciare il calcolo occorre determinare lo stato iniziale dell'atmosfera all'avvio della corsa del modello attraverso l'assimilazione delle osservazioni meteorologiche correnti. Il dominio coperto può essere sia globale oppure riferito ad una sezione particolare dell'atmosfera, nel qual caso sono richieste le condizioni al contorno, e viene discretizzato come una griglia di celle. All'interno di una catena operativa di previsione, è possibile usare più passi temporali e spaziali con una risoluzione maggiore, tuttavia, in tal caso, il modello necessita di essere innestato all'interno di un altro modello a scala globale, che fornisce le necessarie condizioni al contorno. Tali sistemi operativi sono in grado di predire i valori di molte variabili di stato atmosferico, tra cui pressione, temperatura, umidità, velocità del vento e direzione, per ogni cella di griglia e passo temporale.

Nell'ultima decade le capacità di previsioni dei modelli numerici meteorologici hanno aumentato significativamente l'accuratezza sia delle previsioni deterministiche che delle previsioni di insieme. In particolare, nella modalità di insieme vengono inizializzati un certo numero di modelli meteorologici con condizioni leggermente differenti, in modo da tenere in considerazione le incertezze nell'assimilazione iniziale dei dati, così come modificati dalla natura non lineare del sistema atmosferico. Tale modalità di impiego dei modelli meteorologici ha dimostrato che le previsioni probabilistiche di insieme sono particolarmente utili quando le previsioni deterministiche, valide per i giorni successivi, sono altamente inconsistenti.

La capacità di previsione dei modelli numerici di previsione del tempo ha raggiunto oggi uno stato avanzato in cui significativi sono i miglioramenti di stima sia della quantità di precipitazione che della distribuzione spaziale e temporale. Pertanto, risulta appropriato impiegare anche la modellistica meteorologica all'interno di un sistema integrato per la previsione delle piene fluviali.

ARPA-SIM della Regione Emilia Romagna ha avviato la sua attività operativa nella predizione numerica del tempo mediante modello ad area locale (LAM) nel 1993 con la realizzazione operativa del modello idrostatico di equazioni primitive chiamata LAMBO, Modello Area Limitata Bologna. LAMBO è basato su una versione del modello di ETA usato operativamente al Centro Nazionale per la Predizione Ambientale (NCEP) di Washington.

Nelle applicazioni operative LAMBO funziona due volte al giorno e produce le previsioni quantitative di parametri meteorologici, incluso le precipitazioni su tutto il territorio nazionale ad una risoluzione orizzontale di circa 20 km per una serie temporale di 72 ore.

A partire dall'anno 2000 ARPA-SIM, nella struttura di co-operazione tra l'Ufficio Generale di Meteorologia dell'Aeronautica Italiana (UGM), si è unita al progetto internazionale chiamato COSMO (consorzio per la modellistica a scala ridotta) che coordina le attività di Germania, Svizzera, Italia, Grecia e Polonia ai fini dello sviluppo e gestione operativa del modello non idrostatico Lokal Modell (LM), originalmente sviluppato da Deutscher Wetterdienstse della Germania (DWD).

L'applicazione italiana operativa di LM, operativamente gestita da ARPA-SIM nella struttura della cooperazione sopra menzionata, è chiamata LAMI ed include due corse al giorno di Lokal Modell, integrate per 72 ore a 7 km di risoluzione orizzontale. Le condizioni al contorno sono estratte dal modello globale GME di DWD. Le condizioni iniziali sono prodotte da un ciclo di assimilazione continuo durante il quale LM assimila osservazioni, fornite da UGM, con uno schema anch'esso sviluppato dalla cooperazione del consorzio di COSMO. Gli strumenti di supercalcolo richiesti sono forniti dal Centro Computer CINECA di Bologna nell'ambito di uno specifico accordo.

Tutti i prodotti derivati sono disponibili per la realizzazione del sistema di previsione delle piene fluviali per il bacino idrografico del Po. In particolare, sarà fornita la precipitazione quantitativa prevista (QPF), insieme a tutti gli altri parametri superficiali e di atmosfera superiore eventualmente richiesti dal sistema. La QPF sarà resa disponibile nella configurazione necessaria. La configurazione originale è quella del codice GRIB, comunemente usata nella comunità europea meteorologica ed operativa, ma ogni altra configurazione può essere applicata facilmente all'uscita del modello.

ARPA-SIM può offrire anche QPF a 120 ore di estensione temporale dedotta da un Sistema ad Area Limitata d'Insieme chiamata COSMO-LEPS. Il sistema COSMO-LEPS è stato sviluppato da ARPA-SIM durante gli anni passati all'interno di progetti finanziati dal GNDCl Italiano (Gruppo Nazionale Difesa Catastrofi Idrogeologiche) del Consiglio Nazionale per la Ricerca (CNR). ARPA SIM è attualmente un'unità operativa di GNDCl e partecipa ad attività orientate alla progettazione e verifica dei sistemi di modelli idrometeorologici per produrre previsioni appropriate alla presa sostenibile di decisioni relative all'avvenimento delle condizioni di allerta. Altre cooperazioni in tale campo sono state condotte anche all'interno di due progetti europei, AFORISM e TELFLOOD.

COSMO-LEPS, ufficialmente un progetto COSMO coordinato da ARPA-SIM, sta ora girando regolarmente su una base quotidiana con l'ausilio e la cooperazione di ECMWF (Centro Europeo per le Previsioni a Breve Termine). Il sistema è basato sull'integrazione di 5 Lokal Modell, a 10 km di risoluzione orizzontale, su un dominio di integrazione europeo. La corsa dei 5 modelli è inizializzata e guidata da 5 membri di Ensemble selezionati tra quelli di ECMWF-EPS, a mezzo di una procedura sviluppata da ARPA-SIM. La produzione di COSMO-LEPS è anch'essa disponibile come cinque scenari differenti di evoluzione, con la probabilità di avvenimento associata e come mappe di probabilità di eccedenza di soglie di precipitazione predefinite. Come per i prodotti deterministici, gli output dei modelli COSMO-LEPS possono essere configurati per adempiere ai requisiti di progetto.

#### *5.1.2 I modelli idrologici*

Tutte le informazioni meteorologiche, previste ed osservate, provenienti dai diversi sistemi di misura o di simulazione, saranno opportunamente convertiti in un formato comune all'intera catena di modellistica idrologica e idrodinamica che andrà a costituire il sistema integrato.

I modelli di trasformazione afflussi-deflussi prenderanno in considerazione l'influenza della topografia, quantità e intensità di precipitazione, contenuto di umidità del suolo, tipo di suolo e suo utilizzo. Tali modelli impiegheranno convenientemente schemi concettuali ovvero distribuiti nell'interpretazione dei processi fisici. Infatti, risulta opportuno prevedere il calcolo parallelo di una stessa variabile idrologica con approcci diversi, al fine di ridurre l'incertezza sperimentale che ancora risiede nell'impiego pratico di questi strumenti di simulazione ai fini di previsione e prevenzione.

Al fine di ottenere un corretto impiego operativo dei codici di trasformazione afflussi-deflussi, saranno previste adeguate tecniche di validazione, ricostruzione e campionamento dei dati in ingresso al processo di trasformazione numerica. Significativa sarà anche la presenza di tecniche di combinazione di osservazioni multisensore nella stima dei campi di precipitazione.

Nel seguito vengono brevemente descritti i modelli afflussi-deflussi impiegati nel sistema di modellistica di cui al presente progetto.

MIKE 11 NAM del Danish Hydraulic Institute Water & Environment è un modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi deterministico, fisicamente basato, a parametri concentrati, costituito da un set di relazioni matematiche collegate fra loro in modo da descrivere quantitativamente la fase terrestre del ciclo dell'acqua.

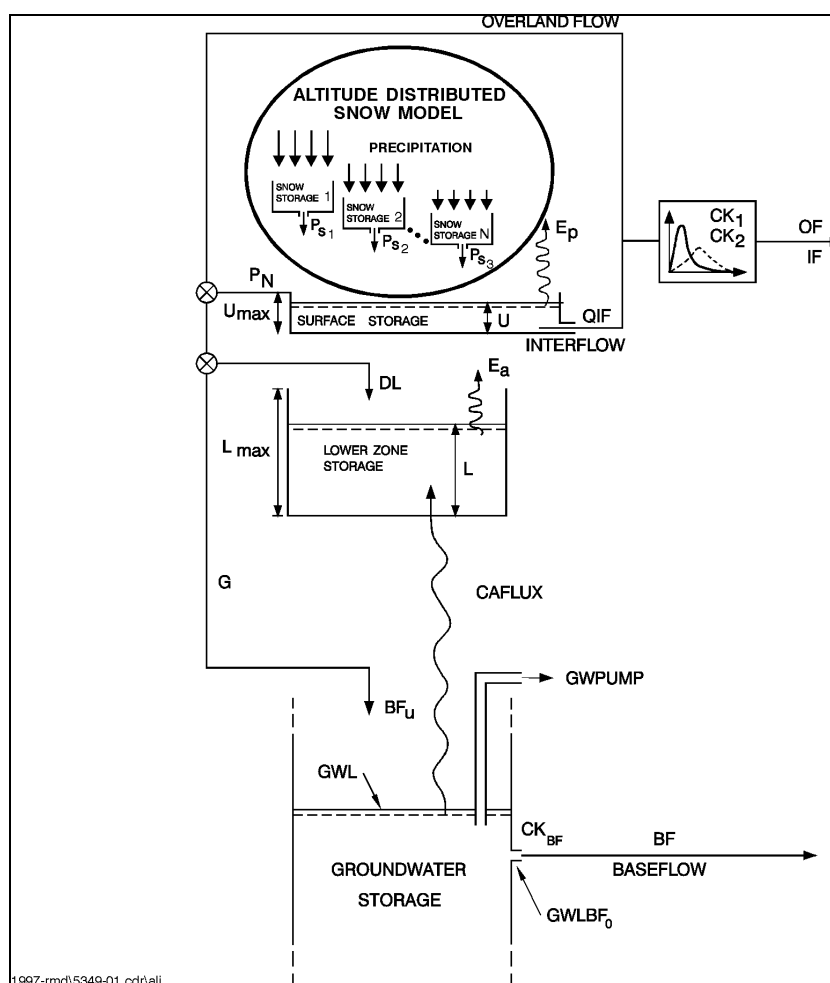
[illegible]

Il modello è fisicamente basato e utilizza equazioni matematiche associate a relazioni semi-empiriche; alcuni parametri possono essere stimati dai dati fisici del bacino, altri sono definiti attraverso valori guida determinati in funzione delle caratteristiche del territorio e possono essere oggetto di calibrazione.

Con riferimento allo schema strutturale riportato nella figura successiva, vengono di seguito descritte in sintesi le funzioni del modello afflussi-deflussi.

Il modulo "neve" è strutturato per sottobacini suddivisi in fasce altimetriche. Pur mantenendo una concettualizzazione a parametri concentrati, NAM consente di rappresentare i processi di formazione e fusione della neve tenendo conto delle caratteristiche altimetriche del bacino e delle differenze di temperatura in quota.

La quantità d'acqua intercettata dalla vegetazione, come quella immagazzinata nelle depressioni del terreno e nelle porzioni più superficiali del suolo coltivato, è simulata con un serbatoio superficiale di capacità massima  $U_{max}$ . La quantità d'acqua nel primo strato sub-superficiale, cioè la zona delle radici ove avviene anche il processo di traspirazione, è simulata con un serbatoio, di capacità massima  $L_{max}$ . Il livello attuale di umidità del suolo  $L$ , che rappresenta lo stato di imbibizione dello strato radicale del terreno, è il nodo centrale del processo di trasformazione afflussi-deflussi. A seconda dello stato di umidità del suolo prevalgono gli effetti di corrivazione superficiale o di assorbimento dell'acqua e rilascio verso la falda e con deflusso ipodermico. Il modello simula quindi processi di trasformazione a "coefficiente di deflusso variabile".



Struttura del modello afflussi-deflussi.

La quantità di umidità  $U$  nel serbatoio superficiale è continuamente diminuita per evaporazione e deflusso ipodermico, ma durante la precipitazione subisce un rapido incremento. Quando viene saturata la capacità massima superficiale  $U_{max}$ , parte dell'eccesso di precipitazione  $P_n$  inizia a scorrere sulla superficie verso la rete di drenaggio, mentre parte si suddivide in infiltrazione verso la zona sottostante e verso la falda profonda.

Anche la quantità d'acqua contenuta nel serbatoio inferiore  $L$  è diminuita dalla traspirazione, mentre il contenuto reale di umidità controlla il tasso di infiltrazione.

L'acqua che percola,  $BF_u$ , cioè la quantità d'acqua che non viene trattenuta in questo serbatoio, passa attraverso la zona insatura e raggiunge, ricaricandolo, il serbatoio della falda satura.

Quando il serbatoio superficiale sfiora, cioè  $U \geq U_{max}$ , l'eccesso di pioggia produce i seguenti fenomeni:

- scorrimento QOF, proporzionale a  $P_n$  e variabile linearmente con il contenuto di umidità del suolo nel serbatoio inferiore  $L/L_{max}$ ;
- infiltrazione, di cui una parte  $DL$  aumenta il contenuto di umidità del serbatoio  $L_{max}$ , mentre l'altra  $G$  percola in profondità e ricarica il serbatoio rappresentante la falda, attraverso parametri costanti inferiori all'unità e adimensionali: CQOF (coefficiente di permeabilità superficiale), TOF (valore soglia per deflusso superficiale) e TG (valore soglia per la percolazione).

Il contributo del deflusso ipodermico QIF è assunto proporzionale ad  $U$  e varia linearmente con il contenuto relativo  $L/L_{max}$  del serbatoio intermedio, secondo una legge simile alle precedenti, con altre costanti adimensionali.

Le perdite per evapotraspirazione sono considerate in prima approssimazione proporzionali al tasso potenziale dal serbatoio superficiale; se il contenuto di umidità  $U$  è inferiore a tale tasso potenziale, la frazione rimanente per raggiungerlo è presa dalla zona delle radici con un tasso reale  $E_a$ , che è proporzionale al tasso potenziale.

Il flusso capillare dal livello di falda verso la zona aerata dipende dallo spessore del tratto insaturo nel profilo del terreno,  $GWL$ , e dal contenuto di umidità relativo  $L/L_{max}$  della zona aerata. Il livello di falda è calcolato considerando un bilancio fra la porzione di ricarica, la porzione capillare, la perdita verso gli strati più profondi e il deflusso di base. Il deflusso di base è calcolato con un serbatoio lineare con una sua propria costante di tempo  $CKBF$ , ed avviene quando il livello di falda è superiore al livello massimo  $GWLBF_o$ .

I deflussi ipodermico e superficiale sono entrambi simulati attraverso un unico serbatoio lineare con costante di tempo  $CK1/2$ , che nel caso di scorrimento superficiale è anche variabile nel tempo. In questo modo si assicura, in pratica, l'assunzione del modello dell'onda cinematica per simulare i processi di deflusso superficiale e ipodermico; il deflusso di base è simulato invece secondo i processi della dinamica sotterranea.

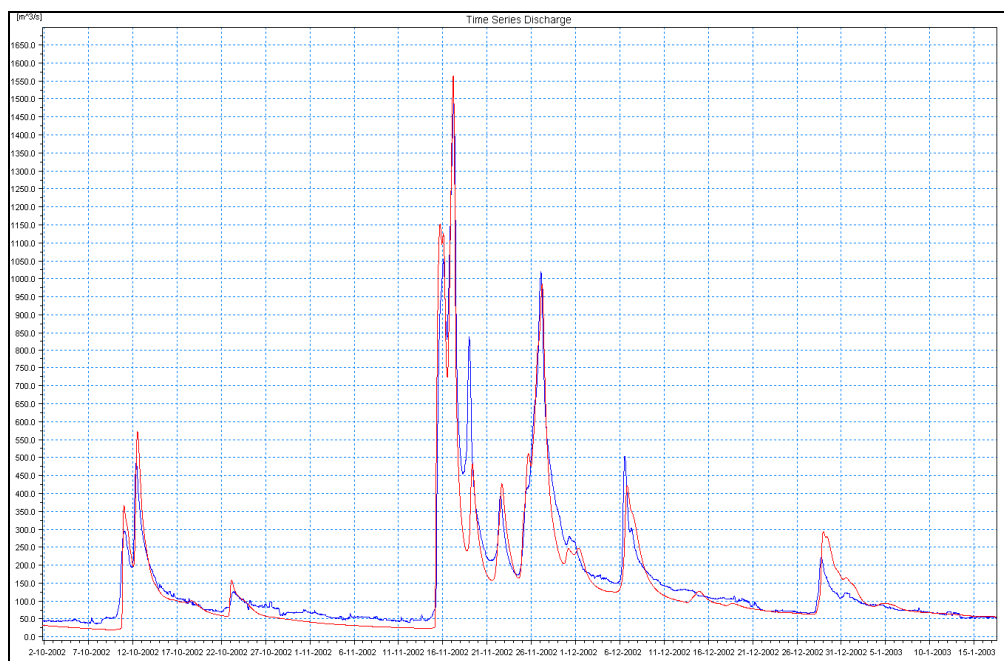
### *Dati in input*

I dati meteorologici necessari per le simulazioni sono: precipitazione, evapotraspirazione potenziale e temperatura. La risoluzione temporale di questi dati dipende dall'obiettivo dell'applicazione del modello e dalla scala di tempo con cui il bacino si presume possa rispondere.

### *Calibrazione*

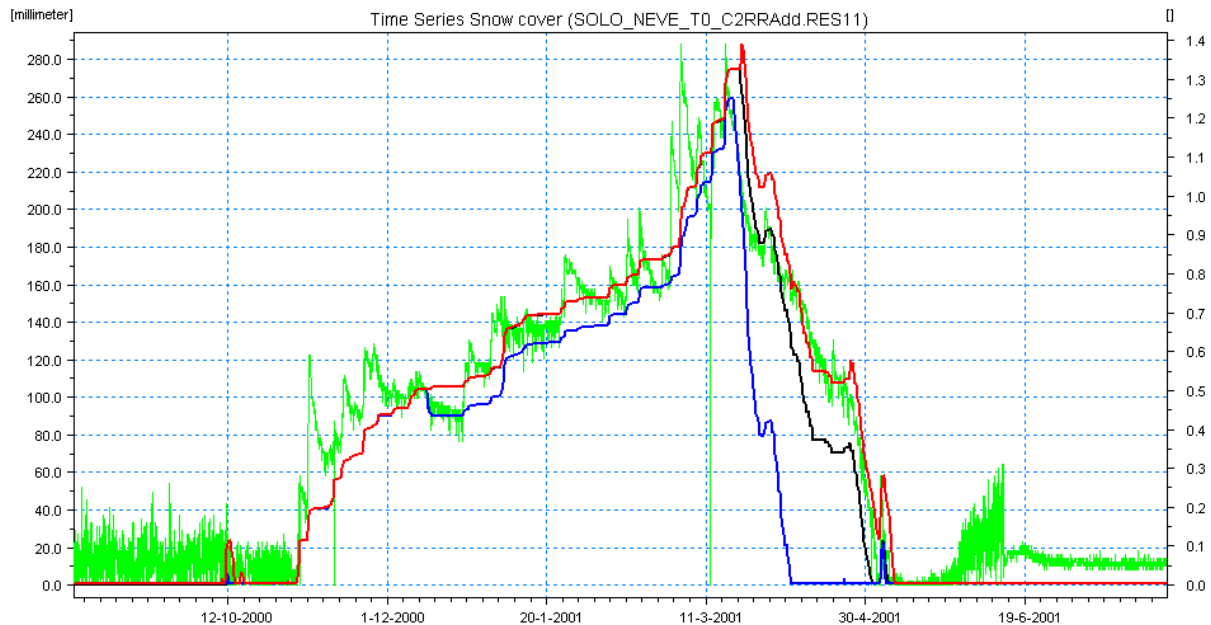
Alcuni parametri del modello hanno un chiaro legame con la realtà fisica; altri hanno invece un significato principalmente matematico, come per esempio le costanti di tempo o i valori soglia dei serbatoi; il modello è sensibile a questi parametri che hanno natura tipicamente empirica.

E' necessario quindi effettuare la taratura del modello, utilizzando serie storiche di dati corrispondenti in input ed in output e confrontando, attraverso procedure grafiche e numeriche, i risultati del modello con i dati osservati.



Confronto in fase di calibrazione tra la serie storica delle portate osservata (in blu) e la serie storica simulata (in rosso) per la stazione idrometrica del Tanaro a Masio.





Esempio di rappresentazione del grado di innevamento simulato al variare dei parametri di calibrazione del modulo "neve" (linea nera:  $T_0=0^\circ$ ,  $C_{\text{snow}}=2$ ; linea blu:  $T_0=0^\circ$ ,  $C_{\text{snow}}=3$ ; linea rossa:  $T_0=2^\circ$ ,  $C_{\text{snow}}=2$ ) rapportato al livello osservato alla stazione nivometrica (linea verde) rappresentato su asse secondario.

### Risultati

I risultati delle simulazioni riportano l'andamento temporale delle seguenti grandezze:

- deflusso di corrivazione superficiale,
- deflusso ipodermico;
- deflusso di base (sostenuto dal serbatoio di falda);
- deflusso totale;
- precipitazione netta (depurata della quota parte di perdite per evapotraspirazione);
- evapotraspirazione reale;
- livelli di umidità del terreno superficiale (U, piccoli serbatoi e trattenimento fogliare);
- livello di umidità del suolo (L);
- livello rappresentativo della falda profonda;
- altezza e consistenza dello strato della neve alle diverse altitudini.

### Applicazione al caso specifico

Il modello NAM sarà utilizzato per simulare la trasformazione afflussi-deflussi nei bacini montani degli affluenti del Po connessi con i tratti di asta fluviale di pianura simulati mediante modello idrodinamico (v. par. 4.3).

La schematizzazione geografica di primo livello sarà funzionale alle principali differenziazioni fisiografico-meteorologiche riscontrabili all'interno di ogni bacino affluente, alla disponibilità dei dati di input e taratura, al criterio di omogeneità del dettaglio territoriale rappresentato dal sistema di bacini complessivamente simulato e al criterio di massima semplificazione compatibile del modello per le applicazioni in tempo reale.

Saranno inoltre considerate le chiusure di bacino assunte nei modelli di previsione dei Centri Funzionali, per consentire la rappresentazione mediante NAM sia delle porzioni di bacino “scoperte”, sia (in sovrapposizione) degli stessi bacini considerati dai C.F. In questo modo sarà possibile sia eseguire simulazioni off-line sul sistema idrografico completo per finalità di studio e calibrazione, sia sostituire in tempo reale eventuali previsioni mancanti dei Centri Funzionali con simulazioni NAM.

La struttura modulare del modello consentirà successive implementazioni di maggior dettaglio territoriale, in base a criteri di progressività, funzionali sia al miglioramento del quadro dei dati descrittivi territoriali e di taratura, sia ai futuri piani di sviluppo del sistema. Il modello sarà connesso mediante opportune interfacce con le diverse serie di input pluvio-termometrico (da modelli meteorologi e da rete in telemisura), pretrattate automaticamente in tempo reale per la validazione e la ricostruzione dei dati mancanti.

La base temporale di simulazione potrà essere adattata alle specifiche esigenze di rappresentatività dei fenomeni e di gestione operativa degli eventi.

L'impostazione a “idrologia continua” del modello a serbatoi consentirà l'aggiornamento automatico in tempo reale dei parametri di stato dei bacini, evitando operazioni di inizializzazione nelle fasi di avvio della procedura di allertamento.

La fase di calibrazione sarà sviluppata in sinergia con il modello idrodinamico interconnesso e secondo procedure oggettive e ripetibili, sia nell'assegnazione dei parametri di taratura sia nella valutazione delle performances rispetto agli eventi-test del periodo di taratura, che saranno espresse mediante opportuni indicatori descritti nel par. 4.3 con riferimento al modello idrodinamico MIKE 11 HD.

### **Il modello afflussi-deflussi HEC-HMS**

Il codice di calcolo HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) è sviluppato dall'U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center.

HMS è un codice ideato per simulare i processi di afflussi e deflussi all'interno di un bacino idrografico, applicabile nelle più generali condizioni geografiche e per diversi problemi di natura idrologica: dalla determinazione dell'onda di piena caratteristica di un corpo idrico in un bacino di notevoli dimensioni, a quella del deflusso relativo a comprensori naturali o urbani di modeste dimensioni. HMS è un modello deterministico, concettuale o empirico (a seconda delle opzioni utilizzate), a parametri concentrati o distribuiti.

HMS suddivide la trasformazione afflussi deflussi in quattro fasi distinte:

- a. Calcolo del volume efficace;
- b. Determinazione dell'idrogramma per deflusso superficiale;
- c. Calcolo del deflusso profondo;
- d. Traslazione dell'onda di piena.

Per ognuna di queste fasi nel calcolo possono essere usate metodologie diverse.

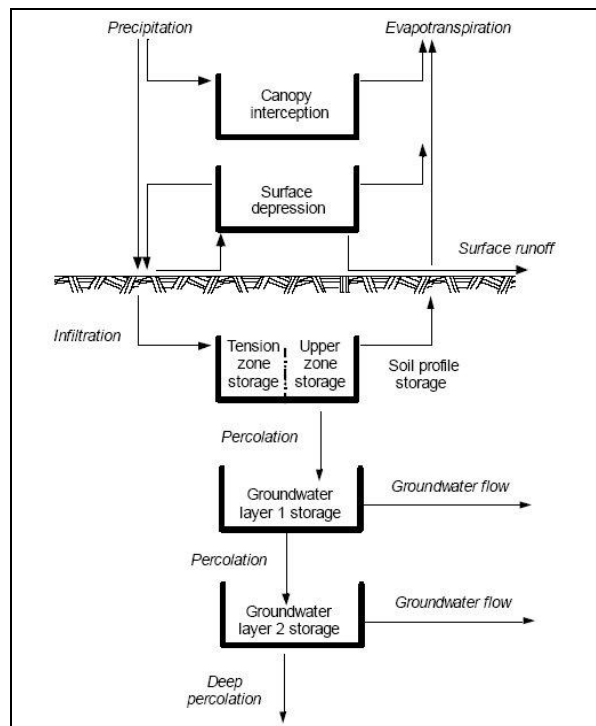
#### *Calcolo del volume efficace*

Il calcolo del volume efficace è fatto partendo dal volume di pioggia depurato dalle perdite per infiltrazione ed evapotraspirazione. Negli anni si sono sviluppate varie metodologie per il calcolo del volume efficace, esse possono essere "ad evento" quando prendono in considerazione solamente il deflusso immediatamente conseguente ad un evento meteorico, oppure "continue" quando descrivono l'intero ciclo idrologico. In HMS sono implementate le seguenti modalità di calcolo:

- |                               |                                 |
|-------------------------------|---------------------------------|
| • Initial and constant-rate   | evento, parametri concentrati   |
| • SCS curve number (CN)       | evento, parametri concentrati   |
| • Gridded SCS CN              | evento, parametri distribuiti   |
| • Green and Ampt              | evento, parametri distribuiti   |
| • Deficit and constant rate   | continuo, parametri concentrati |
| • Soil moisture account (SMA) | continuo, parametri concentrati |
| • Gridded SMA                 | continuo, parametri distribuiti |

I modelli possono essere a parametri concentrati, ogni parametro ha un unico valore all'interno del sottobacino, oppure distribuiti, il sottobacino è suddiviso mediante una griglia a maglie quadrate e in ogni cella possono variare i valori.

Il metodo SMA o gridded SMA permette di rappresentare l'intero ciclo idrologico e quindi di effettuare simulazioni anche in tempo di magra, descrivendo le reali condizioni del terreno prima di un evento meteorologico, indispensabili per una corretta valutazione delle piene. Lo schema concettuale del funzionamento del metodo SMA è riportato nella figura seguente:



Schema concettuale dell'algoritmo SMA

Il sottobacino è suddiviso in una serie di serbatoi tra loro collegati:

- Canopy interception storage, rappresenta la parte di precipitazione che si accumula sugli alberi e sulla vegetazione e non raggiunge il suolo.
- Surface depression storage, rappresenta quelle aree di accumulo d'acqua dovuta alle depressioni presenti nel terreno.
- Soil profile storage, rappresenta l'acqua che si accumula nella parte superiore del terreno. In ingresso al serbatoio si ha l'acqua di percolazione dalla superficie, in uscita l'acqua che percola verso la falda e l'evapotraspirazione. Il serbatoio è diviso in due: Tension zone storage e Upper zone storage. La Upper zone perde acqua per percolazione e per evapotraspirazione, la Tension zone solo per evapotraspirazione.
- Groundwater storage, rappresenta l'acqua contenuta nella falda, può essere rappresentata da 1 o da 2 serbatoi.
- Neve, permette di gestire le precipitazioni nevose e il conseguente scioglimento della neve accumulata. Il sottobacino può essere suddiviso mediante una griglia o per fasce altimetriche.

Gli scambi tra serbatoi si hanno per:

- Infiltrazione, acqua che entra nel terreno dalla superficie. L'acqua disponibile per l'infiltrazione deriva dall'acqua che ha superato l'intercettazione fogliare, più l'acqua già presente nella superficie del terreno. Il volume che si infiltra in un passo di

tempo dipende da: volume disponibile per l'infiltrazione, riempimento del serbatoio *Soil profile* e massima velocità di infiltrazione.

- Percolazione, acqua che dalla zona superficiale del terreno (*Soil profile storage*) si sposta verso le parti più profonde (*Groundwater storage*). La percolazione dipende dal grado di riempimento dei serbatoi. Il calcolo della percolazione è utilizzato anche per lo scambio tra i due serbatoi che rappresentano la falda.
- Volume di piena, volume che supera la capacità di infiltrazione e forma il deflusso superficiale. Tale volume è trattato dal modulo che determina l'idrogramma per deflusso superficiale.
- Deflusso profondo, è il volume in uscita dalla falda. Tale volume è trattato dal modulo che calcola il deflusso profondo.
- Evapotraspirazione (ET), perdita d'acqua dai serbatoi superficiali. È calcolata l'ET potenziale che viene soddisfatta prima dal *Canopy interception*, poi dal *Surface depression* e infine dal *Soil profile*.

#### *Determinazione dell'idrogramma per deflusso superficiale*

L'idrogramma per deflusso superficiale è calcolato a partire dal volume di piena determinato dal modulo descritto al punto precedente. L'idrogramma può essere calcolato con diverse metodologie:

- Idrogramma unitario specificato dall'utente;
- Idrogramma unitario di Clark;
- Idrogramma unitario di Snyder;
- Idrogramma unitario SCS,
- ModClark;
- Approssimazione cinematica.

Come si vede quasi tutti i metodi si basano sul concetto di idrogramma unitario, in cui ogni autore da una formulazione diversa.

Il metodo ModClark è un'evoluzione del metodo dell'idrogramma unitario di Clark. Il metodo originale costruisce l'idrogramma unitario rappresentando due processi di trasformazione della pioggia in eccesso nel formare l'idrogramma:

- Traslazione del volume dal punto di origine al punto di chiusura del bacino;
- Attenuazione della portata dovuta all'accumulo dei volumi all'interno del bacino.

Quest'ultimo processo è calcolato da Clark mediante l'equazione dei serbatoi lineari. Le

caratteristiche del bacino sono definite sulla base di un tempo di concentrazione che rappresenta la parte di traslazione e della costante del serbatoio lineare, che rappresenta l'attenuazione.

Nel metodo ModClark il bacino è suddiviso con una griglia quadrata, per ogni cella è definita l'area e la distanza dal punto di chiusura del bacino. Per ogni cella il tempo di concentrazione è calcolato come:

$$t_{cell} = t_c \frac{d_{cell}}{d_{max}}$$

Dove  $t_{cell}$  è il tempo di concentrazione della cella,  $t_c$  è il tempo di concentrazione del bacino,  $d_{cell}$  è la distanza dal punto di chiusura del bacino e  $d_{max}$  è la distanza dal punto di chiusura della cella più distante.

Questo metodo, considerando anche che l'input di pioggia di ogni cella può essere differenziato, può considerarsi semidistribuito. Infatti il modello non considera gli effettivi percorsi fatti dall'acqua all'interno del bacino, ma valuta comunque, anche se solo in forma geometrica, la differenziazione del contributo di parti diverse del bacino.

L'ultimo metodo è di tipo concettuale, schematizza il bacino con uno o due versanti definiti come due canali molto larghi, il cui input è dato dal volume di piena, che confluiscono in un ulteriore canale di sezione e pendenza data. Il metodo risolve l'equazioni del moto nella forma cinematica all'interno dei canali schematizzati.

### *Calcolo del deflusso profondo*

Il calcolo del contributo della falda può essere fatto con tre metodi:

- Portata costante mensile;
- Recessione esponenziale;
- Serbatoi lineari.

Il metodo dei serbatoi lineari è utilizzabile solamente se la valutazione del volume efficace è fatta con il metodo SMA. Per ogni serbatoio che rappresenta la falda è definita la costante del serbatoio e il numero di serbatoi in cascata che simulano il deflusso.

### *Traslazione dell'onda di piena*

L'idrogramma generato da ogni sottobacino può essere sommato a quelli di altri sottobacini, il collegamento tra diversi sottobacini è fatto attraverso elementi canale che

traslano gli idrogrammi dai punti di chiusura dei sottobacini al punto di chiusura dell'intero bacino. Questa traslazione può essere fatta con diversi metodi, inoltre possono essere considerati anche altre trasformazioni che avvengono durante la traslazione.

La traslazione può essere calcolata con i seguenti metodi:

- Onda cinematica, nel canale sono risolte le equazioni del moto nell'approssimazione cinematica.
- Tempo di ritardo, l'idrogramma viene traslato temporalmente senza nessuna modificazione.
- Modified Puls, viene costruita una scala di deflusso che associa la portata in uscita con il volume immagazzinato nel tratto di canale, relazione che può per esempio essere calcolata con un modello idrodinamico calcolando i profili stazionari per diverse portate.
- Muskingum;
- Muskingum-Cunge standard;
- Muskingum-Cunge a 8 punti, invece di considerare la sezione del canale o circolare definisce la sezione attraverso 8 punti, che consentono di rappresentare una sezione con golene.

Oltre agli elementi canali all'interno di un bacino possono essere definiti anche altri tipi di elementi che sono collegati agli elementi canale:

- Confluenze, permettono di sommare gli idrogrammi provenienti da due differenti canali.
- Diversioni, permettono di togliere acqua da un canale e convogliarla in un altro;
- Sorgenti, permettono di assegnare una portata in ingresso nel bacino (per esempio una portata misurata, o proveniente da un altro modello).
- Serbatoi, permettono di simulare laghi o paludi all'interno del bacino.

### **Il modello afflussi-deflussi TOPKAPI**

Il modello afflussi-deflussi TOPKAPI (TOPographic Kinematic APproximation and Integration) è un modello di tipo distribuito, sviluppato con l'obiettivo di rispondere ai seguenti requisiti:

- solida impostazione fisica, basata su parametri interpretabili fisicamente in maniera immediata;

- applicabilità del modello a scale spaziali crescenti, conservando all'aumentare della scala valori fisicamente significativi dei parametri;
- semplicità e parsimonia nella parametrizzazione.

Tali caratteristiche minimizzano le esigenze di calibrazione del modello e ne consentono quindi l'applicazione anche a bacini non adeguatamente strumentati, per i quali non sia possibile calibrare il modello mediante adattamento delle portate calcolate a quelle misurate. Ovviamente il successo dell'applicazione del modello dipende fortemente dalla disponibilità di dati di tipo topografico, geologico e pedologico il più possibile dettagliati.

I parametri fisici sui quali il modello si basa sono costituiti da:

- permeabilità a saturazione,  $k_s$ ;
- contenuto d'acqua a saturazione e contenuto d'acqua residuo,  $\theta_s$  e  $\theta_r$ ;
- esponente  $\alpha$  della legge di trasmissività adottata;
- spessore  $L$  dello strato di suolo interessato dal drenaggio;
- coefficiente di scabrezza di Manning,  $n$ , per il deflusso superficiale;
- coefficiente di scabrezza di Manning,  $n$ , per il deflusso nella rete drenante.

L'applicazione del modello si basa su una fase di calibrazione off-line in cui i calcoli e le operazioni che descrivono la dinamica di accumulo e trasferimento dell'acqua su un bacino vengono effettuate su ciascuna cella del Modello Digitale del Terreno (DEM).

Il modello proposto è strutturato in base a tre moduli che rappresentano rispettivamente la componente del suolo, la componente del deflusso superficiale e la componente del deflusso lungo la rete drenante, per ciascuna delle quali si adotta uno schema di propagazione ad onda cinematica.

La componente del suolo riveste nel modello un ruolo fondamentale, in quanto è il bilancio idrico del suolo che regola la dinamica della produzione di deflusso superficiale, per cui l'immagazzinamento dell'acqua nel suolo rappresenta la principale variabile di stato del sistema.

In base alla saturazione raggiunta nel suolo si innesca il meccanismo del deflusso superficiale. Entrambe le componenti del suolo e del deflusso superficiale alimentano la componente della rete drenante.

I dati di natura idro-meteorologica di ingresso al modello TOPKAPI sono le precipitazioni e le temperature o l'evapotraspirazione potenziale.

I dati di precipitazione vengono forniti al modello in continuo, con un passo temporale costante, definito sulla base delle modalità con cui tali dati sono resi disponibili. Essi possono essere forniti sia in forma puntuale in corrispondenza dei pluviometri appartenenti

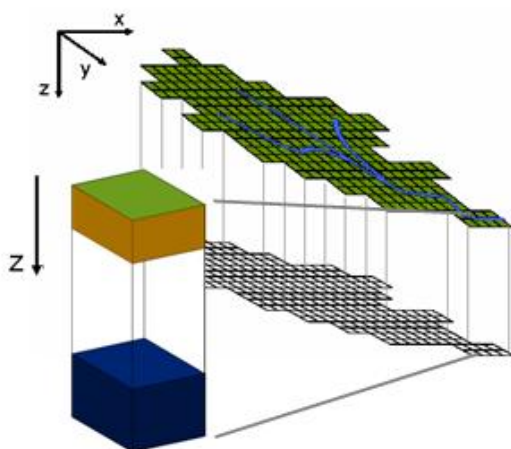


alla rete di misura che copre l'area in esame, che in forma spazializzata sul bacino, tramite la mappatura della precipitazione su una griglia regolare. Nel primo caso i dati puntuali vengono distribuiti sulle celle del DEM mediante la determinazione delle aree di influenza; nel secondo caso, la precipitazione su griglia regolare è riportata, con elaborazioni interne, alla magliatura di calcolo del modello. Questa seconda modalità, accoppiata con opportune procedure di spazializzazione, magari anche con tecniche multisensore e con campi pluviometrici in uscita dai modelli di previsione meteorologica, si presta bene all'uso operativo per la previsione in tempo reale.

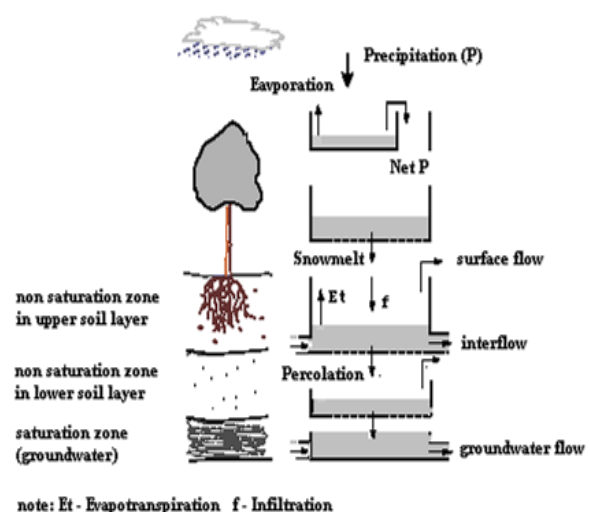
Anche i dati di temperatura vengono forniti al modello con il medesimo passo temporale, nelle due possibili forme puntuale o spazializzata, e vengono distribuiti sulle celle del modello con le medesime tecniche. Nel caso del dato puntuale, per ogni cella si effettua una correzione del dato di temperatura fornito dal termometro, in base alla differenza di quota tra la cella stessa e il termometro, tenendo conto di un gradiente termico al variare dell'altitudine di  $0,06^{\circ}\text{C}$  ogni metro. Il dato di temperatura ottenuto sulla cella viene quindi utilizzato per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale, mediante una forma semplificata del metodo della radiazione.

In alternativa è possibile fornire direttamente al modello i dati di evapotraspirazione potenziale, sempre con le stesse modalità di ingresso.

L'evapotraspirazione effettiva viene poi calcolata dal modello in base al contenuto d'acqua nel suolo e tenendo conto delle caratteristiche colturali.



**Schematizzazione topografica del bacino**



**Analisi delle componenti di bilancio idrico e della dinamica di accumulo d'acqua nel suolo**

### *La componente del suolo*

La componente del suolo è interessata da un flusso d'acqua in direzione orizzontale in condizioni di non saturazione, definito drenaggio, che ha luogo in uno strato superficiale, di spessore limitato, interessato da una conduttività idraulica elevata, dovuta alla macroporosità.

Per la formazione dei deflussi superficiali si adotta un meccanismo di saturazione dal basso, altrimenti detto eccesso di saturazione o meccanismo di Dunne, trascurando invece l'eventuale attivazione del meccanismo hortoniano dovuto all'eccesso di infiltrazione. Infatti il meccanismo di eccesso di infiltrazione è caratteristico di una scala di modellazione locale, mentre il meccanismo di eccesso di saturazione, essendo legato ad un fenomeno di tipo cumulativo ed essendo condizionato da un movimento di ridistribuzione laterale dell'acqua nel suolo, diviene dominante all'aumentare della scala di modellazione. Nel modello distribuito tale ipotesi si traduce nel fatto che in ciascuna cella la produzione di deflusso superficiale si attiva quando la cella stessa è completamente satura.

Per la componente del suolo, come pure per quella del deflusso ipodermico e del deflusso in rete drenante, si adotta uno schema di propagazione ad onda cinematica.

La descrizione del flusso orizzontale in condizioni insature dipende dalla conoscenza del profilo verticale del contenuto d'acqua nel suolo. Tuttavia lo spessore dello strato di suolo ad elevata conduttività idraulica, effettivamente interessato dal drenaggio, è pressoché trascurabile rispetto alle dimensioni orizzontali in gioco.

Per tale ragione si suppone che il flusso orizzontale possa essere valutato assumendo la conduttività idraulica a saturazione costante su tutto lo strato ed utilizzando il contenuto d'acqua totale integrato sul profilo verticale. In accordo con tale ipotesi la trasmissività in condizioni di non saturazione viene calcolata con la seguente espressione approssimata:

$$T(\tilde{\Theta}) = k_s L \tilde{\Theta}^\alpha \quad (1-1)$$

in cui:

$k_s$  conduttività idraulica a saturazione, costante su tutto lo strato [m/sec]; (N.B. permeabilità orizzontale, il cui valore è in genere maggiore di circa un ordine di grandezza rispetto alla corrispondente permeabilità verticale)

$\tilde{\Theta} = \frac{1}{L} \int_0^L \tilde{\vartheta}(z) dz$  valore medio lungo il profilo verticale del contenuto d'acqua ridotto [numero puro];

$\tilde{g} = \frac{g - g_r}{g_s - g_r}$	contenuto ridotto d'acqua nel suolo [numero puro];
$g_r$	contenuto d'acqua residuo, ossia acqua che non può essere rimossa per capillarità o per gravità [numero puro];
$g_s$	contenuto d'acqua a saturazione [numero puro];
$g$	contenuto d'acqua nel suolo [numero puro];
$\alpha$	parametro dipendente dalle caratteristiche del suolo [numero puro];
$L$	spessore dello strato interessato dal flusso orizzontale [m];
$z$	direzione verticale

L'abbinamento della (1-1) con un approccio di tipo cinematico porta ad un'equazione di serbatoio non lineare zero-dimensionale per ciascuna cella del DEM, nel modello distribuito, e per l'intero bacino o sottobacino per il modello aggregato; l'immagazzinamento dell'acqua nel suolo rappresenta la variabile di stato:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = xp - \left( \frac{\alpha + 1}{\alpha x} \right)^\alpha \frac{1}{\left[ k^{\frac{\alpha+1}{\alpha}} - (k-1)^{\frac{\alpha+1}{\alpha}} \right]^\alpha} C_i V_i^\alpha \quad \text{singola cella, modello distribuito (1-2)}$$

$$\frac{\partial V_{tot}}{\partial t} = Nx p - \bar{C} \left[ \frac{\alpha + 1}{\alpha Nx} \right]^\alpha V_{tot}^\alpha \quad \text{intero bacino o sottobacino, modello aggregato (1-3)}$$

dove nella (1-3):

$$\frac{1}{\bar{C}} = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{\left( \frac{k}{N} \right)^{\frac{\alpha+1}{\alpha}} - \left( \frac{k-1}{N} \right)^{\frac{\alpha+1}{\alpha}}}{C_i^{1/\alpha}} \right]^\alpha \quad \text{resistenza media equivalente} \quad (1-4)$$

Nelle (1-2) e (1-3)  $i$  è l'indice della singola cella, mentre  $k$  è la somma di tutte le celle drenate dalla cella  $i$  e rappresenta quindi la topologia dei collegamenti tra le celle;  $N$  è il numero totale di celle.

In base al valore assunto dalla variabile di stato è possibile calcolare rispettivamente per ogni cella e per l'intero bacino, per ogni passo di tempo, la portata uscente, che viene ripartita tra suolo a valle e rete drenante.

### *La componente del deflusso superficiale*

Il raggiungimento delle condizioni di saturazione in una particolare zona determina l'attivazione del deflusso superficiale. L'afflusso alla componente superficiale è ottenuto come l'eccesso di precipitazione rispetto alla quantità necessaria a rendere saturo lo strato di suolo.

Come già detto si adotta anche in questo caso l'approssimazione dell'onda cinematica e si utilizza come legge di resistenza la formula di Manning, nell'ipotesi di sezione rettangolare infinitamente larga:

$$Q = \frac{1}{n} i_f^{1/2} x y^{5/3} \quad (1-5)$$

in cui:

$n$	coefficiente di Manning per i versanti [ $m^{-1/3} \text{ sec}$ ]
$i_f$	pendenza della cella
$x$	larghezza della sezione, pari alla risoluzione della cella
$y$	altezza del tirante idrico

Anche in questo caso si perviene ad un'equazione di serbatoio non lineare zero-dimensionale per ciascuna cella del DEM, nel modello distribuito, e per l'intero bacino o sottobacino, nel modello aggregato, formalmente analoghe a quelle per la componente del suolo.

### *La componente del deflusso in rete drenante*

Un certo numero di celle del Modello Digitale del Terreno sono interessate dalla presenza della rete drenante. In tali celle viene calcolato l'afflusso alla rete drenante per via ipodermica e superficiale, come frazione della portata totale uscente dalla cella che contiene un tronco di rete. Una volta che sia nota la portata che alimenta il deflusso lungo la rete drenante, questo viene descritto mediante un modello cinematico del tutto analogo a quello illustrato per la componente del deflusso superficiale.

Il TOPKAPI è un modello afflussi-deflussi, finalizzato alla rappresentazione degli idrogrammi di piena a partire dall'input meteorologico e dalle caratteristiche fisiche e morfologiche del bacino idrografico, più che alla descrizione accurata della propagazione dell'onda di piena lungo l'alveo; per tale ragione esso non va visto come un modello di tipo idraulico nel senso rigoroso del termine. Ne consegue che, per gli scopi prefissi, non è necessario descrivere in maniera accurata la geometria della sezione dell'alveo, ma è sufficiente darne una rappresentazione schematica.

Alla luce delle considerazioni fatte la rete drenante è rappresentata mediante tronchi a sezione rettangolare, aventi la lunghezza della cella e larghezza costante lungo la cella, ma variabile da una cella all'altra.

La larghezza variabile è l'unico aspetto che differenzia lo schema di aggregazione per la rete drenante, rispetto alle altre componenti.

Si adotta anche in questo caso la formula di Manning, e si mantiene anche l'ipotesi di sezione rettangolare infinitamente larga:

$$Q_r = \frac{1}{n} i_f^{1/2} D h^{5/3} \quad (1-6)$$

in cui:

$n$	coefficiente di Manning per i canali [ $m^{-1/3} \text{ sec}$ ]
$i_f$	pendenza della linea di fondo, assunta uguale alla pendenza della cella
$D$	larghezza della sezione
$h$	altezza del tirante idrico

Di nuovo si perviene ad equazioni di serbatoio non lineare zero-dimensionale analoghe alle precedenti.

#### *La componente dell'accumulo/scioglimento neve*

Per ogni singolo sottobacino viene usato un algoritmo che si basa sul bilancio energetico in termini di calorie a livello del manto nevoso e sul bilancio di massa del manto nevoso. Le equazioni che esprimono il bilancio di energia sono le seguenti:

$$E_{fin} = E_{in} + C_{er} C_{sn} E T_0 + C_{sg} T_0 P \quad \text{per} \quad \Delta T \leq \Delta T_{sn} \quad (1)$$

oppure

$$E_{fin} = E_{in} + C_{er} C_{sn} E T_0 + [C_{sg} T_0 + C_{lf} + C_{sa} \Delta T] P \quad \text{per} \quad \Delta T > \Delta T_{sn} \quad (2)$$

dove:

$E_{fin}$	l'energia finale (Kcal);
$E_{in}$	l'energia iniziale (Kcal);
$P$	la precipitazione caduta nell'intervallo $\Delta t$ (mm/ $\Delta t$ );
$C_{er}$	fattore di conversione del calore latente in radiazione, in pratica il calore latente di evaporazione ( $\approx 606,5 - 0,695 \Delta T$ Kcal Kg <sup>-1</sup> );
$\Delta T$	la variazione rispetto $T_0$ della temperatura media ragguagliata (°K);
$T_0$	il punto di fusione della neve (273 °K);
$C_{sn}$	un fattore di riproduzione per tener conto dell'albedo;
$C_{sg}$	il calore specifico del ghiaccio (0.5 Kcal °K <sup>-1</sup> Kg <sup>-1</sup> );

- $C_{lf}$  il calore latente di fusione dell'acqua ( $79.6 \text{ Kcal Kg}^{-1}$ );  
 $C_{sa}$  il calore specifico dell'acqua ( $1 \text{ Kcal } ^\circ \text{K}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$ );  
 $\Delta T_{sn}$  la variante rispetto  $T_0$  della temperatura di soglia della neve ( $^\circ \text{K}$ );  
 $ET_0$  Evapotraspirato.

L'equazione che esprime il bilancio di massa è la seguente:

$$E_{fin} = C_{sg} W_{0sn} T_0 + C_{lf} R_{sn} \quad (3)$$

da cui:

$$R_{sn} = \frac{E_{fin} - C_{sg} W_{0sn} T_0}{C_{lf}}$$

dove

- $R_{sn}$  scioglimento del manto nevoso nell'intervallo  $\Delta t$ ;  
 $W_{0sn}$  spessore del manto nevoso finale (mm).

## 5.2 I bacini piemontesi

Il Sistema Informativo di Previsione delle Piene (SIPP) attualmente operativo presso il Centro Funzionale del Piemonte consente di prevedere in tempo reale le portate ed i relativi livelli lungo tutto il reticolo idrografico principale del Piemonte integrato alla valutazione degli apporti idrici provenienti dai territori di monte (Liguria, Valle d'Aosta e Canton Ticino).

Il cuore del sistema di previsione e gestione delle piene è costituito da un software, chiamato FLOOD WATCH (Sorvegliare le piene), che gestisce il flusso delle informazioni, organizza e controlla i dati di ingresso ai modelli di previsione e prepara la pubblicazione dei risultati delle simulazioni modellistiche. FLOOD WATCH è costruito in ambiente ArcView® ESRI. La previsione delle portate fluviali è effettuata attraverso l'applicazione di una serie di modelli numerici che, in base ai dati di input costituiti dalle osservazioni della rete idrometeorologica, è in grado di simulare i processi di trasformazione afflussi-deflussi e di ricostruire la dinamica degli alvei fluviali.

I modelli di simulazione con cui è costruito il SIPP sono deterministici e fisicamente basati. Il sistema di modellazione è costituito da tre moduli del codice di simulazione MIKE11®, del Danish Hydraulic Institute [DHI, 2001-2004]:

- il modulo idrologico Rainfall-Runoff RR, che simula il processo di trasformazione afflussi-deflussi sui sottobacini idrografici;

- il modulo idrodinamico Hydrodynamics HD che simula lo scorrimento delle acque negli alvei fluviali e nelle aree di esondazione [DHI, 2001 b];
- il modulo di correzione Data Assimilation DA che tramite l'acquisizione di dati idrometrici consente di stimare gli errori compiuti dal modello e di correggerne la previsione.

In particolare RR è un modello idrologico concettuale, "a serbatoi", concentrato. Il flusso dell'acqua sul singolo sottobacino è simulato per mezzo dei processi di riempimento e svuotamento di quattro serbatoi in serie che rappresentano rispettivamente:

- i processi di formazione e fusione della neve, in funzione dell'altitudine e della temperatura;
- l'invaso temporaneo di parte dell'acqua piovana sulla superficie del bacino;
- l'imbibizione dello strato superficiale del terreno, il cui stato regola la formazione del deflusso superficiale (coefficiente di deflusso variabile nel tempo);
- la raccolta ed il rilascio nel sistema delle falde sotterranee dell'acqua che percola nel terreno.

I parametri che regolano i modelli matematici dei processi fisici descritti da RR sono in parte dedotti da misure e dati sulle caratteristiche intrinseche dei bacini e in parte oggetto di calibrazione.

Il modulo di formazione e fusione della neve tiene conto della distribuzione del bacino in fasce altimetriche, apportando una adeguata correzione della temperatura con la quota.

L'eccesso di pioggia che il terreno non è in grado di assorbire scivola sulla superficie del bacino, seguendo la pendenza dei versanti, e confluisce verso la sezione di chiusura. Il processo di scorrimento superficiale è rappresentato per mezzo di due serbatoi in cascata (sistema di Nash non lineare) funzione dalle caratteristiche geometriche del terreno. Oltre allo scorrimento superficiale è calcolata anche la quota parte di deflusso ipodermico.

L'acqua che penetra nel terreno è raccolta e rilasciata nel tempo dal sistema idrico sotterraneo: il deflusso di base sostiene la fasi di esaurimento delle piene e garantisce le portate fluviali in tempo di deflussi medi e di magra.

Ogni sottobacino idrologico in cui è stato suddiviso il territorio di studio è collegato alla rete idrografica secondo due modalità: bacini di testata, sono quelli che recapitano il deflusso in modo concentrato nel punto più a monte di un ramo della rete idrografica o in una confluenza puntuale; bacini laterali, che recapitano il loro deflusso in modo distribuito lungo un determinato segmento di un corso d'acqua.

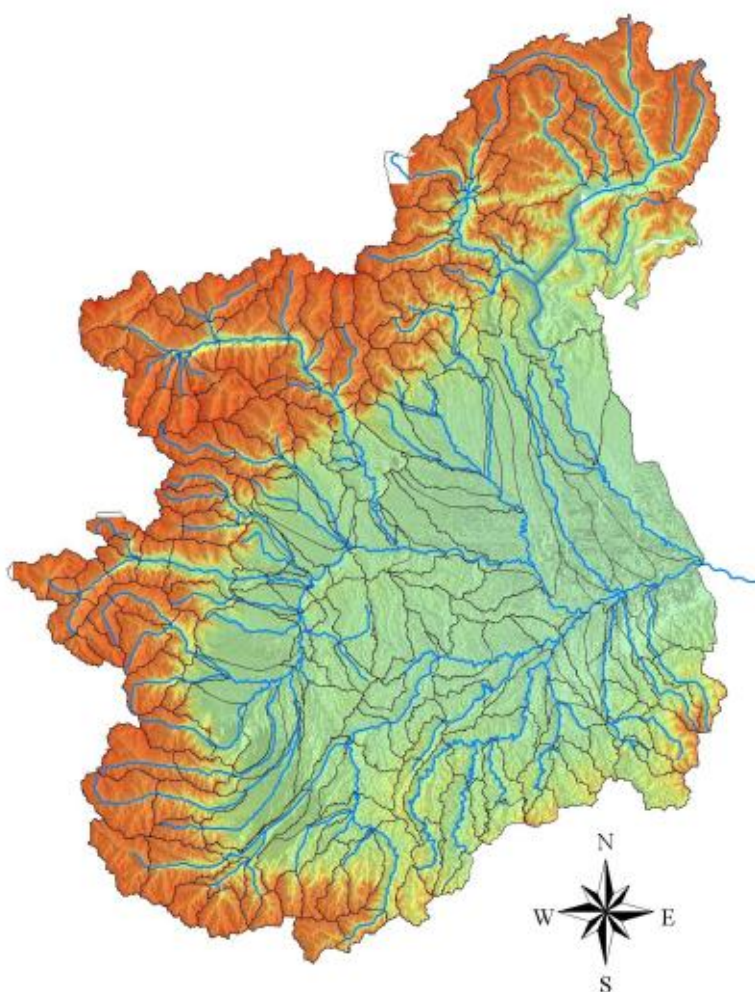
Lungo la rete idrografica il moto dell'acqua ed i processi di composizione e traslazione delle onde di piena sono simulate dal modulo HD, che implementa le note equazioni di de St. Venant del moto non stazionario in sistemi idrici a pelo libero. I tratti della rete idrografica oggetto di simulazione sono rappresentati per mezzo di sezioni trasversali. Alcune sezioni derivano da rilievi topografici e batimetrici diretti, recenti o storici, altre, lungo segmenti della rete minore, sono state dedotte dalla cartografia. Oltre alla geometria dei corsi d'acqua nel modello sono implementate le caratteristiche geometriche delle aree golenali che contribuiscono alla laminazione delle portate di piena. Il modello HD riceve, compone e trasla i contributi di deflusso che derivano dai sottobacini idrologici calcolando e prevedendo l'andamento dell'onda di piena verso valle, in termini di variazioni nel tempo e nello spazio del livello idrometrico e della portata.

Per quanto riguarda l'applicazione operativa, come ingresso al modello, il SIPP può disporre dei dati della rete idrometeorologica automatica in tempo reale del Piemonte integrata con la rete della Valle d'Aosta, della Liguria e del Cantone Svizzero del Ticino con una consistenza di circa 350 stazioni di misura pluvio-termometriche (densità media di una stazione ogni 100 kmq) ed un centinaio di stazioni idrometriche. Ai dati osservati si aggiungono poi le previsioni quantitative di pioggia elaborate dal gruppo dei meteorologi del Centro Funzionale.

Per gestire la variabilità spaziale delle forzanti atmosferiche e della risposta dei bacini idrografici si è costruito un sistema ad albero suddividendo il bacino idrografico complessivo in una serie di 267 sottobacini indipendenti che costituiscono le unità di base per la modellazione.

Dal punto di vista idraulico, il reticolo coperto dalla simulazione è formato da circa 80 corsi d'acqua e tre grandi laghi prealpini ed ha una lunghezza complessiva di circa 3500 Km. I punti di controllo, costituiti dalla rete regionale di monitoraggio idrometrico, consiste in un centinaio di stazioni distribuite su tutto il reticolo.





Struttura del modello. In evidenza la partizione del bacino in sottobacini unitari ed il reticolo idrografico simulato.

Le previsioni meteorologiche utilizzate sono fornite dal servizio meteorologico regionale e consistono nei valori di precipitazione media areale relativamente alle zone di allerta su finestre di sei ore, per un orizzonte previsionale di 48 ore. Nella seguente tabella sono riportate le sezioni per cui sono state eseguite le analisi delle prestazioni del modello.

*Sezioni fluviali analizzate nell'analisi delle prestazioni del modello*

Fiume	Sezione fluviale	Area del Bacino (km <sup>2</sup> )	Tempo di corrvazione (ore)
Po	Carde'	510	7.7
	Carignano	3976	18.0
	Torino	5362	23.8
	Crescentino	13230	27.0
	Isola S. Antonio	25857	44.4
	Becca	36770	51.9
Chisone	S. Martino	581	6.0
Banna	Santena	361	18.3
Dora Riparia	Susa	827	6.3

Stura di Lanzo	Lanzo	580	5.5
Orco	Cuorgne'	630	5.8
Dora Baltea	Tavagnasco	3313	11.6
Sesia	Borgosesia	696	7.0
	Palestro	2587	18.8
Scrivia	Serravalle	619	10.0
Tanaro	Piantorre	499	9.0
	Farigliano	1508	14.8
	Alba	3379	17.8
	Masio	4534	25.3
	Montecastello	7994	36.4
Stura di Demonte	Fossano	1249	9.5
Belbo	Castelnuovo	422	15.1
Bormida	Mombaldone	392	12.2
	Cassine	1521	23.2
Orba	Casalcermeli	798	14.2
Toce	Candoglia	1475	9.0
Diveria	Crevoladossola	321	3.8

Le prestazioni del sistema sono costantemente valutate e, nel caso di eventi di piena significativi, le valutazioni vengono archiviate e vanno a costituire il punto di partenza per definire gli sviluppi del sistema stesso. Le analisi delle prestazioni vengono eseguite fuori linea cercando di valutare sia il comportamento del modello idrologico in sé, sia il peso degli errori presenti nelle previsioni meteorologiche sulle previsioni del SIPP. Per far questo si utilizzano sia le osservazioni delle stazioni meteorologiche sia previsioni meteorologiche fornite da diversi modelli, ad esempio il modello del centro meteorologico europeo (ECMWF), il modello operativo ad area limitata italiano (LAMI) ed una sua versione sperimentale ad alta risoluzione condotte nel corso del progetto HYDROPTIMET che hanno consentito di verificare le prestazioni della catena previsionale.

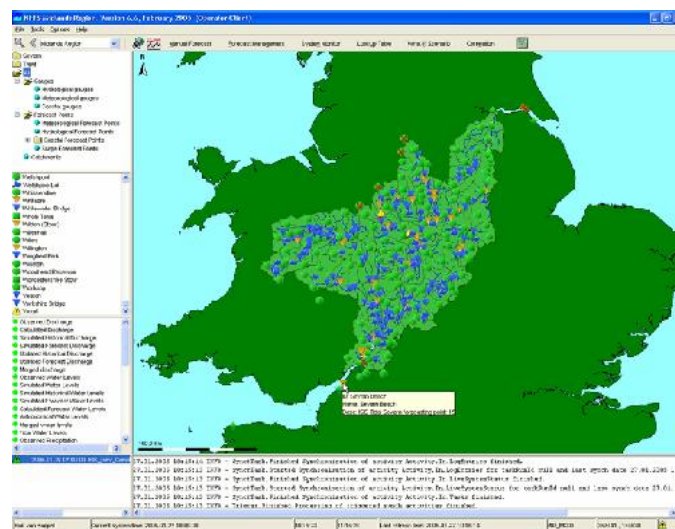
## 6 AUTOMAZIONE E VISUALIZZAZIONE

Tutti i modelli idrologici-idraulici sopra descritti saranno integrati nello stesso ambiente modellistico, che consenta di utilizzare diversi modelli, in modo intercambiabile o in parallelo, per ciascun componente. L'ambiente di modellistica verrà collegato ad un database centrale e consentirà di incapsulare vari codici di simulazione preesistenti a mezzo di un'appropriata integrazione del singolo modello. Tale integrazione prevederà la conversione dei dati di input, quali le serie temporali e i parametri inseriti nel database principale, in un formato leggibile dal modello considerato, archiviando opportunamente i risultati dello stesso modello sempre nel database principale. Questa peculiarità risulta

particolarmente conveniente per permettere agli utilizzatori finali di implementare il sistema con gli ulteriori modelli di dettaglio che possono adattarsi anche meglio a condizioni locali, oltre a consentire un confronto revisionale tra un certo numero di simulazioni al fine di una migliore interpretazione del fenomeno di piena in esame durante le operazioni in tempo reale.

### 6.1 *Scheduling dei task computazionali*

La realizzazione del presente sistema di modellistica previsionale comporta un ampio utilizzo di applicazioni software che seguono la filosofia dell'architettura chiusa. Senza l'intervento dei produttori del software originale, l'estensione del sistema mediante di modelli di simulazione aggiuntivi oppure di nuovi flussi di dati, quali quelli provenienti dallo stato dell'arte delle previsioni meteorologiche, diventa spesso impossibile. Per risolvere queste aspetto tecnico, fondamentale per una corretta impostazione del funzionamento attuale e futuro del sistema previsionale, verrà realizzato un ambiente generico di sistema, con architettura aperta, che incorporerà un gran numero di strumenti per la gestione dei dati e fornirà contemporaneamente un'interfaccia applicativa a qualsiasi modellistica esterna, consentendo così la gestione dei processi previsionali.



Applicazione dell'ambiente di sistema: esempio di Delft-FEWS.

La natura modulare ed altamente configurabile dell'ambiente di sistema consentirà di impiegare efficacemente sia semplici modelli previsionali sia sistemi molto complessi, che

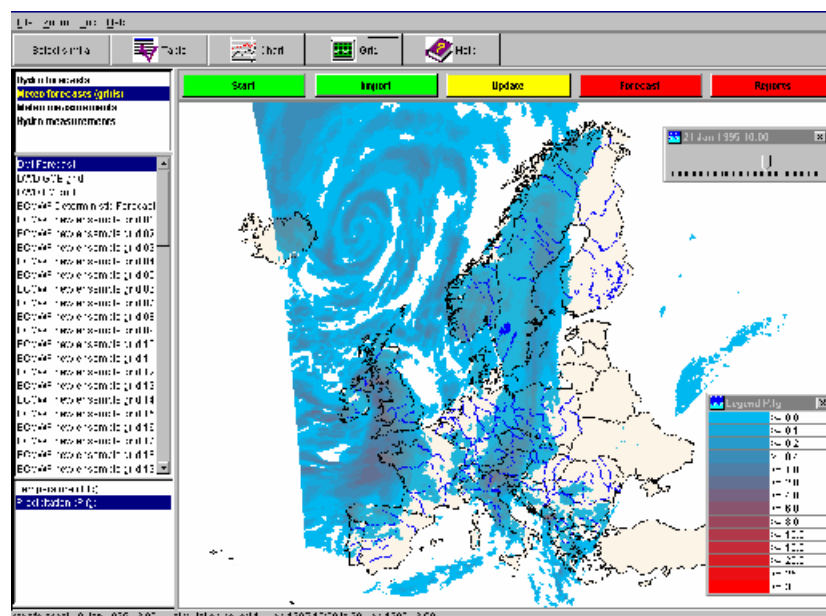
utilizzano un gran numero di modelli idrologici e idraulici. L'architettura dell'ambiente di sistema verrà applicata in modalità automatica e distribuita.

### *Connettività a dati esterni*

Di grandissima importanza in una catena operativa di modellistica previsionale delle piene fluviali è una connessione efficiente alle sorgenti di dati esterni. L'ambiente di sistema fornirà moduli di importazione standard per importare dati da sorgenti esterne in tempo reale di dati idrologici e meteorologici. L'importazione di dati esterni supporterà anche le previsioni meteorologiche ensemble, quali quelle fornite da ARPA SIM.

I dati saranno importati preferibilmente utilizzando formati standard di interscambio, quali XML, GRIB (per le previsioni numeriche meteorologiche) e ASCII, ma all'occorrenza verranno impiegate anche procedure di importazione alternative. Verrà predisposta anche l'immissione manuale di dati; come pure, se disponibile, sarà importata anche la qualità del dato.

I dati importati possono includere, per esempio, le serie temporali ottenute dai sistemi in telemisura, ad esempio le osservazioni di livelli idrometrici e di precipitazioni, ma anche dati di previsione meteorologica, dati radar di precipitazione, ecc..

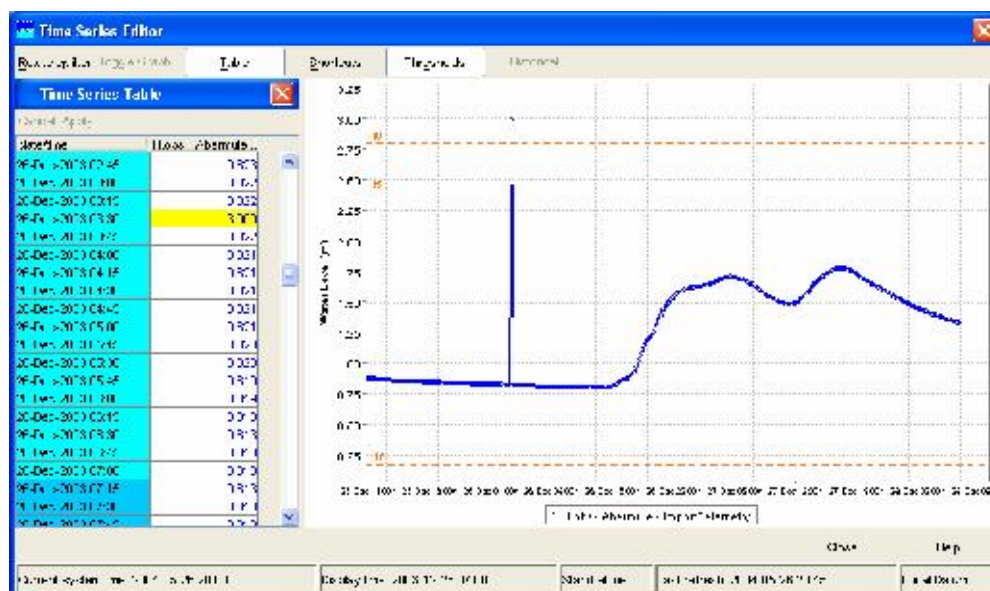


Campo di precipitazione previsto importato da un modello di previsione meteorologico.

### *Validazione, interpolazione e trasformazione dei dati*

Particolare enfasi verrà riposta nell'ambiente di sistema al fine di controllare la qualità del dato. Attraverso un processo per passi successivi, i dati eventualmente forniti ai modelli previsionali saranno caratterizzati dalla migliore qualità possibile. Questo processo di controllo della qualità del dato avverrà mediante tre moduli sequenziali: validazione, interpolazione e trasformazione.

La validazione è il modulo di default al quale saranno sottoposti tutti i dati. Utilizzando impostazioni di validazione configurabili, i dati potranno essere controllati contro un gran numero di potenziali problemi, ad esempio improvvisi ed eccessivi cambiamenti dell'andamento temporale dei dati osservati. I dati che violano le regole di validazione saranno marcati, ma non rimossi. Il flag di qualità governerà i moduli successivi.

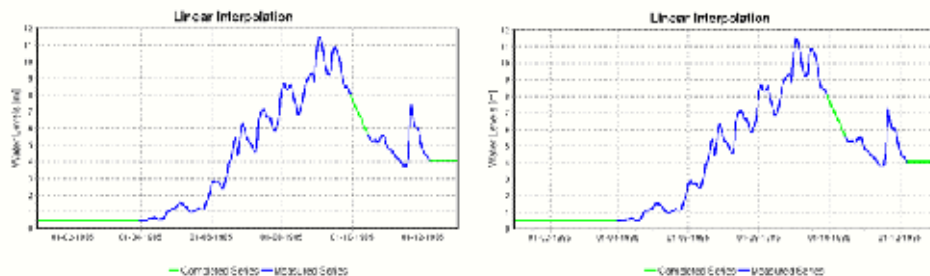


Un dato puntuale viene marcato come invalido.

Il modulo di interpolazione genera dati per una data località e a desiderati istanti temporali mediante tecniche di interpolazione seriale e spaziale. Generalmente questo modulo verrà applicato per riempire dati mancanti nelle serie temporali importate, ma anche per derivare una singola serie temporale da dati distribuiti spazialmente.

L'interpolazione seriale, cioè l'interpolazione nel tempo all'interno di una singola serie, serve per ottenere una serie temporale completa, cioè senza dati mancanti. Saranno disponibili molte opzioni di interpolazione, ad esempio interpolazione lineare, a blocchi ovvero immissione di valori di default. Il metodo di interpolazione da adottare sarà

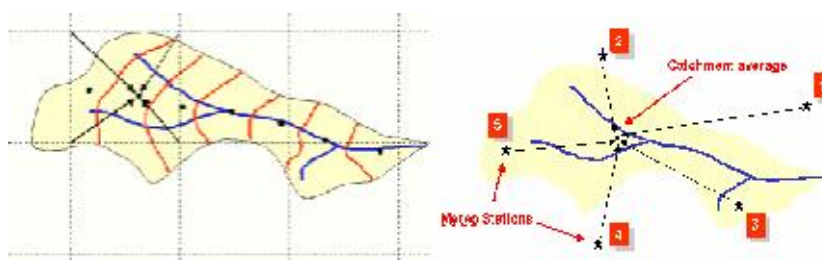
configurabile al variare delle circostanze in cui deve essere applicato (ad esempio impiegando interpolazioni per passi multipli, cioè riempiendo le interruzioni temporali dei dati in modo iterativo secondo la dimensione temporale dei dati mancanti).



Applicazione dell'interpolazione seriale per ottenere una serie temporale completa per l'intero periodo di previsione.

L'interpolazione spaziale può essere applicata quando esiste una certa relazione tra le località circostanti. Le procedure potranno servire per riempire dati mancanti ad una determinata località e per generare una singola serie temporale mediate sul bacino di competenza.

La base per un'interpolazione spaziale è una griglia irregolare con i cosiddetti punti di interpolazione. Per ogni punto di interpolazione sono note le coordinate e la quota rispetto ad un sistema di riferimento geografico. I dati dalle singole località o provenienti da una griglia vengono poi mappate sulla griglia irregolare di interpolazione.



Applicazione dell'interpolazione spaziale a partire da dati puntuali o da una griglia

I metodi di interpolazione disponibili saranno funzioni di interpolazione, kriging, poligoni di Thiessen e l'interpolazione proporzionale all'inverso della distanza. Per alcuni metodi verranno prese in considerazione informazioni aggiuntive, quali la differenza di quota, che possono essere particolarmente rilevanti quando si trattano dati sensibili, come la

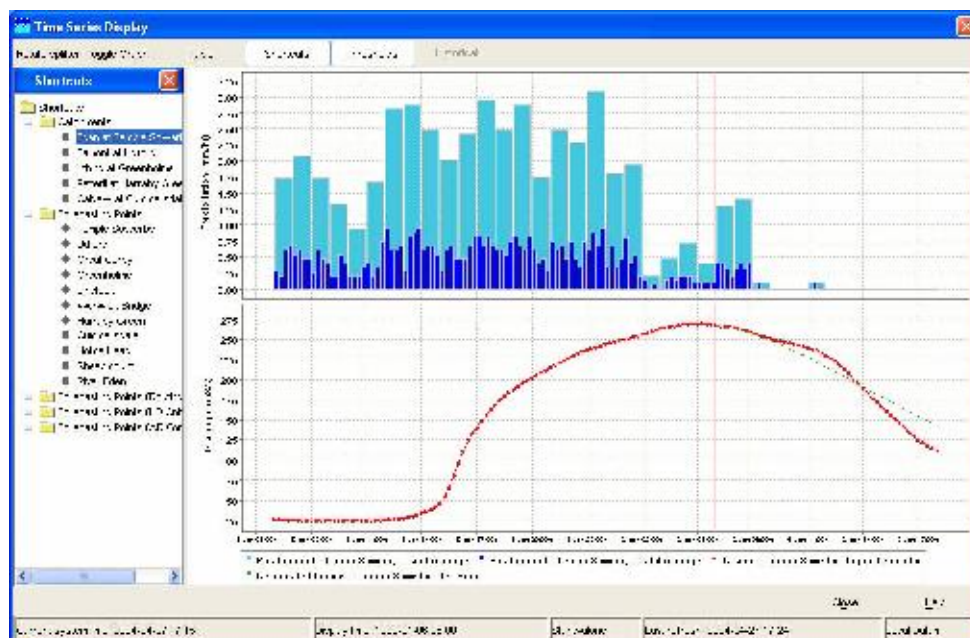


temperatura, necessari nella simulazione di alcuni processi della trasformazione afflussi-deflussi, ad esempio lo scioglimento nivale.

Il modulo di trasformazione contiene invece una collezione di funzioni che permettono di trasformare il dato originario. Le funzioni spaziano da una semplice traslazione di una serie temporale ad una trasformazione complessa di dati con assegnate scale spaziali e temporali. Tali funzioni saranno raggruppate in trasformazioni di base, facilmente configurabili, ciascuna con le proprie caratteristiche specifiche:

- Aggregazione/disaggregazione
- Trasformazioni basate su regole, medie pesate, scale di deflusso
- Trasformazioni da valori non equidistanti a valori equidistanti
- Funzioni matematiche
- Calcolo matriciale

Le opzioni della gerarchia dei dati, previste per il modulo di trasformazione, consentiranno di utilizzare sorgenti di dati alternative nel caso le sorgenti primarie possano non essere disponibili durante il processo di previsione. L'uso di queste opzioni assicurerà la continuità del processo di previsione delle piene fluviali, anche se i dati disponibili in tempo reale risultano incompleti o inconsistenti.

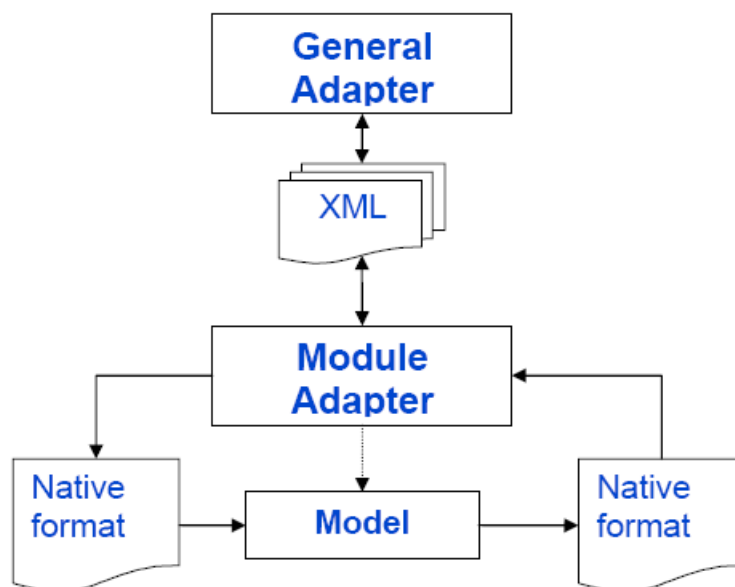


Esempio di trasformazione mediante aggregazione dei dati temporali da 15 minuti a 1 ora.

### *Implementazione di modelli esistenti nell'ambiente di sistema*

La filosofia dell'ambiente di sistema è di fornire un sistema aperto da permettere di utilizzare un gran numero di modelli previsionali esistenti. Questo concetto sarà supportato dalla fornitura di un modulo denominato "Adattore Generale", che consentirà la comunicazione a moduli esterni impiegando un'interfaccia pubblica basata su XML. Tale interfaccia in combinazione con l'Adattore Generale renderà l'architettura capace di aggiungere qualsiasi modello previsionale.

Un modulo adattatore tra i formati nativi dell'applicazione esterna e l'interfaccia XML verrà opportunamente realizzato per consentire l'implementazione dei modelli impiegati.



Vista schematica del concetto di Adattore Generale.

Il grande vantaggio di questa interfaccia aperta è che i modelli idrologici e idraulici esistenti possono essere facilmente integrati nel sistema previsionale, senza la necessità di costose nuove applicazioni per utilizzare un modello specifico.

### *6.2 Visualizzazione e amministrazione web*

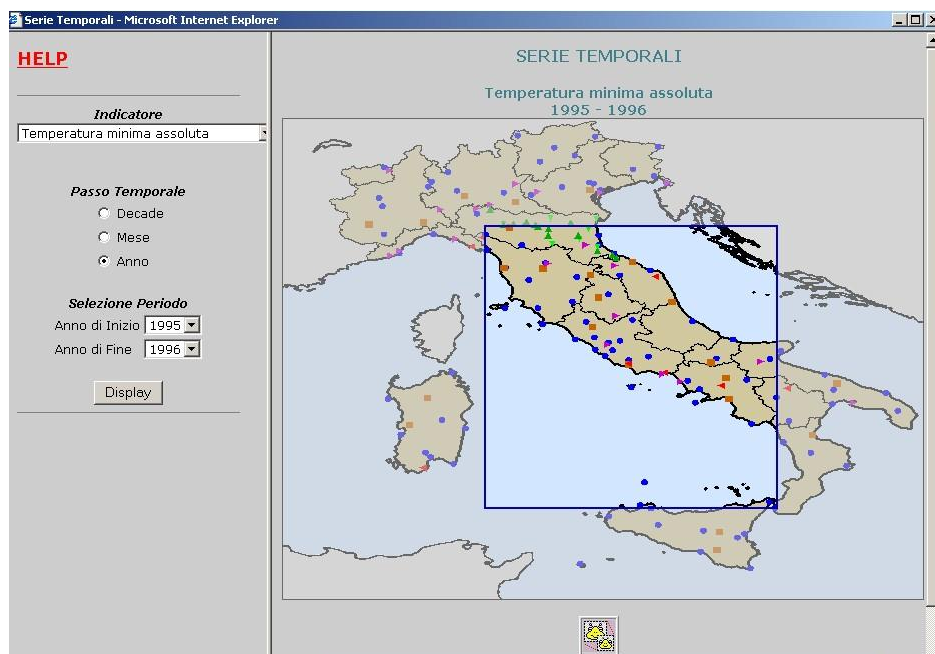
Per questa parte del progetto sarà realizzata un'applicazione per la consultazione, attraverso un'interfaccia web, di una base dati contenente i risultati prodotti da modelli idrologici e le serie storiche di dati misurati e di estrarre da questi informazioni visive e



numeriche di interesse. Inoltre, verrà opportunamente integrato uno strumento per la gestione di allarmi e l'invio di questi su web, GSM e fax.

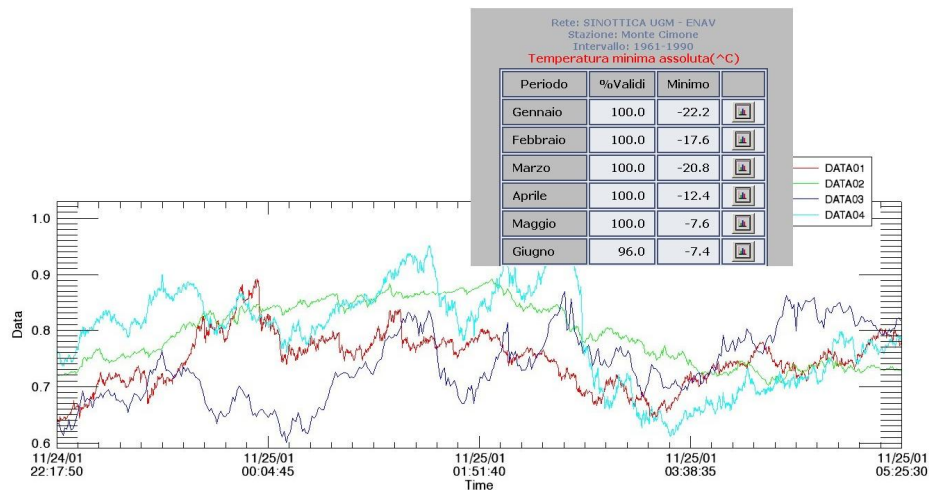
Poiché i dati in questione devono essere opportunamente interpolati, geo-referenziati e visualizzati con relativa cartografia, il motore grafico e di calcolo utilizzato sarà il tool RSINC IDL (Interactive Data Language) con la sua estensione web ION (IDL on the Net) particolarmente utilizzato in questo ambito. L'intera applicazione farà anche un uso esteso di tecnologie standard per la gestione del data-base e per il web design & management (HTML, Java Script, Java).

Di base l'applicazione presenterà al client una mappa interattiva della regione geografica di interesse e dovrà permettere di operare delle query dinamiche nel data-base. Le richieste saranno instradate attraverso un approccio tipico dei GIS in cui l'utente seleziona con il mouse l'area di interesse e ha così la possibilità di estrarre automaticamente i dati osservati e previsti di cui necessita.



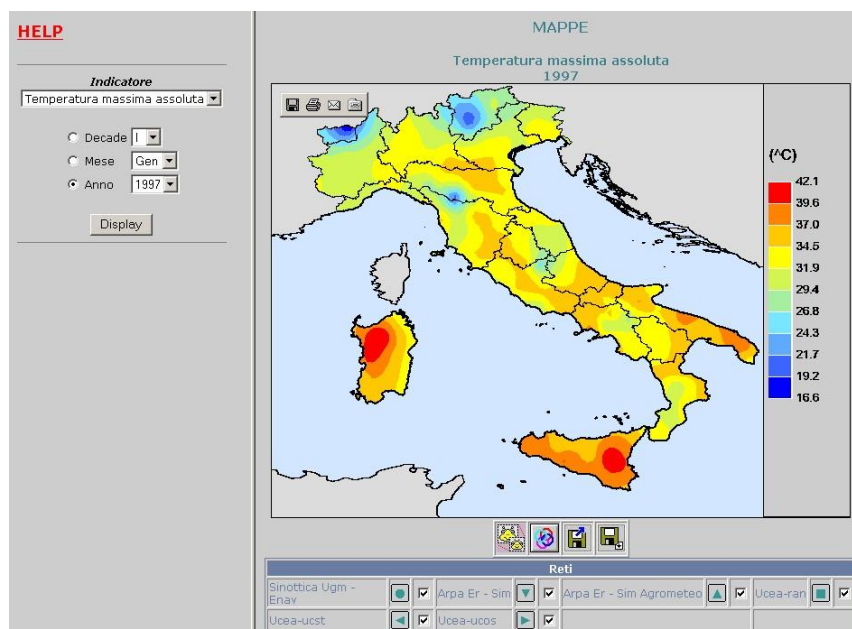
Mappa interattiva: l'utente può operare query in un dbase selezionando la regione geografica di interesse con il mouse.

I dati stessi saranno presentati in forma numerica, mediante charts che ne rappresentino l'andamento storico o opportunamente grigliati, come mappe di intensità, e proiettati sulla cartografia.



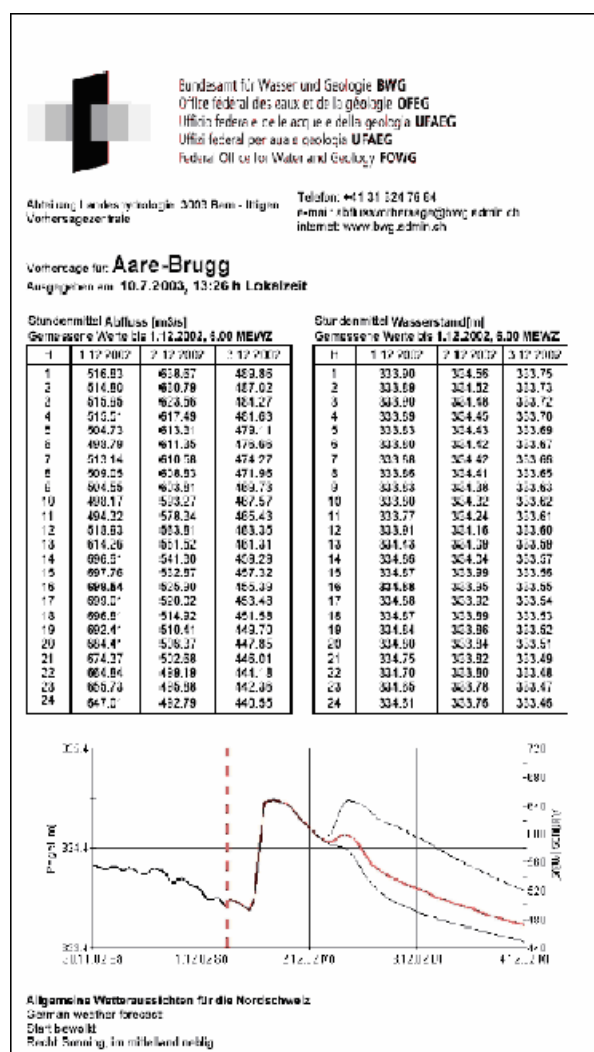
Presentazione dati in forma tabellare e mediante charts.

La gestione della visualizzazione e quindi il design della architettura software sarà costituita da una struttura delle view architettata per layers sovrapponibili. Fra questi ne sarà reso disponibile uno per la visualizzazione diretta di dati matriciali (es. griglie rasterizzate, immagini radar o satellitari monocromatiche o RGB).



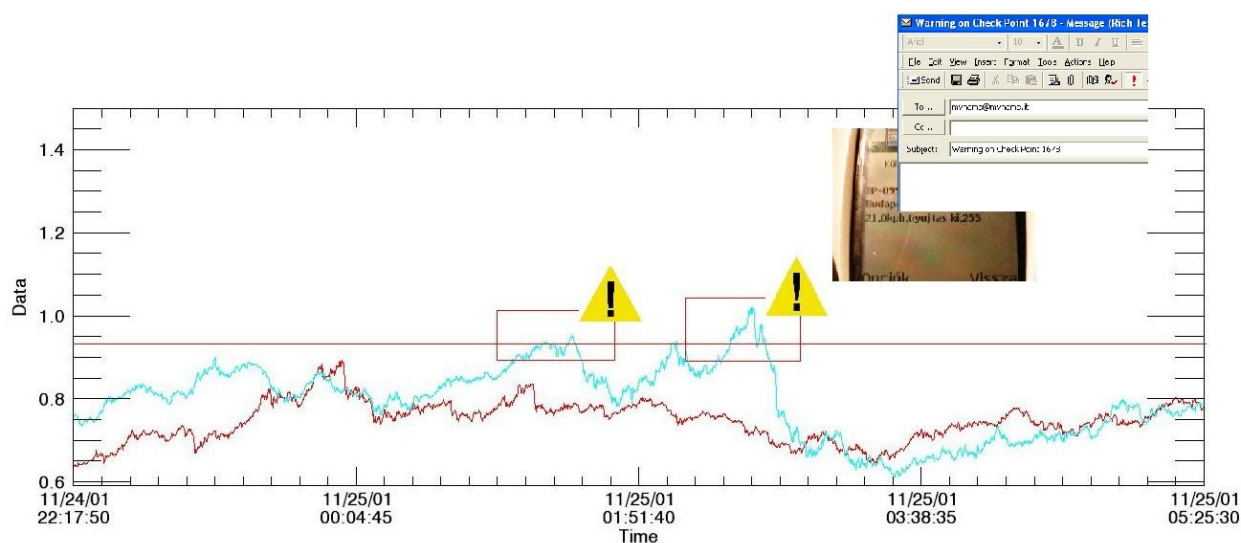
Esempio di visualizzazione di un layer contouring.

L'accesso alla web application sarà regolamentato attraverso l'autenticazione del client la cui collocazione in una data classe dell'access control list (ACL) sarà gestita in modo semplice a livello di administrator e attraverso l'interfaccia web. Il profilo del client potrà essere aggiornato ad ogni connessione in modo che lo stato delle analisi e visualizzazioni richieste possa essere opportunamente salvato in un template ed i layout di presentazione dei dati organizzati dal client possano essere recuperati alla successiva connessione. Sarà reso disponibile uno strumento per la creazione di report grafici e numerici con elementi estratti direttamente dalla web page.



Esempio di report generato automaticamente.

Inoltre l'applicazione includerà un tool per la gestione e l'invio di allarmi idrologici. Questi potranno essere inviati su web unitamente a reports HTML che informino il destinatario sulla natura dell'allarme, come SMS e fax in forma testuale.



Gestione degli allarmi per superamento valori di soglia.

L'installazione dell'applicazione avverrà su due web-server distinti in modo da garantire la continuità del servizio anche in caso di manutenzione di uno dei sistemi.

## 7 IL CENTRO OPERATIVO

Il Centro Operativo verrà ospitato e gestito dal Centro Funzionale di riferimento per l'asta principale del fiume Po, che, ai sensi della convenzione cui al presente progetto, è da identificarsi nella sede di Parma del Centro Funzionale della Regione Emilia-Romagna (la realizzazione e gestione del Centro Funzionale della Regione Emilia-Romagna è stato affidato, dalla Giunta Regionale, ad ARPA, e in particolare ad ARPA-SIM).

Il Centro Operativo avrà la funzione di concentrare in unica sede le attività ed il personale necessari alla gestione informativa in tempo reale della piena di Po e di tutte le attività preparatorie e di mantenimento del sistema modellistico di previsione.

Condizione di base dei locali da utilizzare è la loro non vulnerabilità in caso di eventi idrometeorologici estremi; la sede di Parma presso l'edificio demaniale che ospita A.I.PO, A.d.B. e ARPA-SIM si presenta sicuramente idonea.

Per quanto riguarda gli spazi saranno garantite la disponibilità e l'interconnessione di ambienti idonei ad ospitare tutte le funzioni necessarie. Pertanto, gli spazi necessari saranno atti ad ospitare le apparecchiature informatiche di acquisizione dati ed informazioni idro-meteorologiche e quelle destinate al funzionamento dei modelli di

previsione. Tali funzioni saranno localizzate in diverse zone del medesimo locale; quest'ultimo sarà abbastanza ampio da permettere lo stazionamento del personale necessario durante l'esercizio, oltre ad un eventuale incremento di postazioni. In tale locale sarà garantita anche un'adeguata climatizzazione con condizioni di temperatura ed umidità sufficientemente costanti da garantire sia il buon funzionamento delle macchine, sia buone condizioni operative per gli utilizzatori.

Qualora parte delle apparecchiature suddette non richieda intervento costante da parte degli utilizzatori, come nel caso di front-end e server ad accesso remoto, apparecchiature di rete, ecc., le medesime potranno trovare collocazione anche in altro locale idoneo (dal punto di vista termoigrometrico).

Particolare importante per il funzionamento ininterrotto H24 durante le situazioni di allarme o emergenza risiede nella sicurezza dell'alimentazione elettrica. I locali suddetti saranno coperti da gruppo di continuità in grado di garantire il funzionamento delle apparecchiature essenziali per un tempo sufficiente anche in assenza di alimentazione, mentre sarà disposto anche il collegamento con un gruppo elettrogeno autoinnescante, di potenza sufficiente a supportare il funzionamento delle stesse apparecchiature essenziali al funzionamento del Centro Operativo.

Sarà inoltre predisposto un locale di idonee dimensioni atto ad ospitare le riunioni di coordinamento fra i vari Enti coinvolti; tale locale sarà dotato delle necessarie apparecchiature di comunicazione ed eventualmente di visualizzatori dei dati e delle previsioni (anche tramite proiezione). La capienza di tale sala sarà di almeno 30 posti.

Saranno infine predisposti diversi locali ad uso ufficio ed archivio oltre, ovviamente, a quelli di servizio.

### *7.1 Le attività di realizzazione del Centro Operativo*

Fra le attività preparatorie vanno individuate quelle relative alla attrezzatura ed approvvigionamento dei locali e alle dotazioni strumentali e quelle di implementazione delle procedure informatiche.

Vi sarà quindi una prima fase di acquisizione delle attrezzature ed allestimento dei locali, che saranno precedute dalla esatta individuazione delle necessità e dall'esecuzione delle forniture e dei lavori necessari.

Seguirà poi la fase di implementazione vera e propria con l'attivazione e la verifica delle connessioni dati ed il trasferimento on-line dei modelli di previsione parallelamente sviluppati e implementati off-line.

Le fasi di preparazione logistica dei locali e delle attrezzature comprenderanno gli studi preliminari ed i progetti esecutivi per la realizzazione od adeguamento dell'impiantistica e delle reti, insieme agli eventuali lavori edili necessari.

## *7.2 Le attività di carattere ordinario*

Una volta realizzato e reso operativo il Centro, si provvederà a tutte le attività ordinarie per mantenere il funzionamento in condizioni ottimali.

Pertanto, sarà predisposto il mantenimento in attività di un numero adeguato di persone per le funzioni di sorveglianza e controllo del funzionamento dei vari apparati, allineamento, quantità e qualità dei dati in ingresso ai sistemi, oltre che all'aggiornamento periodico dei dati morfologici, topografici, di misura delle velocità ed implementazione delle scale di deflusso, taratura degli strumenti sul territorio, ecc..

Alcune di tali attività saranno oggetto di successivi e periodici interventi, in particolare:

- aggiornamento dei dati topografici e cartografici, ribattiture di sezioni e profili, piani quotati;
- misure di velocità, aggiornamento e verifica periodici delle scale di deflusso;
- aggiornamento dei modelli in seguito a rilascio di nuove versioni dei programmi di base;
- ampliamento o ritaratura dei modelli successiva ad eventi significativi.

Per tutte le altre attività a carattere continuativo sarà prevista un'idonea dotazione di personale in servizio permanente, che dovrà svolgere attività di mantenimento delle attrezzature informatiche, monitoraggio del funzionamento, redazione degli eventuali bollettini periodici, smistamento delle informazioni con tutti i mezzi previsti e verifica dei mezzi stessi, archiviazione dei dati ed eventuale aggiornamento dei sistemi.

Altra attività da considerarsi ordinaria consisterà nella formazione ed aggiornamento periodico del personale addetto al servizio ordinario o straordinario.

Tra le attività del Centro Operativo vi sarà poi il supporto tecnico-scientifico al Gruppo di Coordinamento Unificato (GCU), così come specificato nella convenzione cui il presente progetto si riferisce.

Nell'ambito del personale del Centro Operativo, che potrà essere sottoposto anche a turnazione periodica, saranno stabiliti, nei periodi maggiormente a rischio o su indicazione del GCU, appositi turni di reperibilità nei periodi non ordinariamente lavorativi (notturni e fine settimana).

### *7.3 Le attività di carattere straordinario*

Rientrano in questa categoria tutte le attività da svolgersi nelle fasi immediatamente precedenti, durante e dopo gli eventi di piena significativi del fiume Po.

Allorquando vi siano sensibili indicazioni di prevedibilità di un evento intenso, in linea di massima a partire dalla fase di previsione meteo, sarà disposta dal Responsabile del Centro Funzionale ARPA-SIM l'attivazione del Servizio di Reperibilità o l'attivazione con permanenza h24 di personale presso il Centro Operativo.

Ognuno degli Enti aderenti avrà accesso in tempo reale alle previsioni ed ai dati provenienti o prodotti dal Centro Operativo, per l'espletamento dei propri compiti istituzionali, secondo modalità tecniche da concordare. Le modalità saranno comunque tali da garantire la ridondanza dei sistemi di comunicazione per garantire la sicurezza del funzionamento, utilizzando a tal fine anche tecnologie WEB, SMS, fax on demand, scheda vocale telefonica, secondo quanto concordato all'interno del GCU.

Resta comunque inteso che ognuno degli Enti coinvolti rimane pienamente responsabile di tutte le proprie attività e doveri istituzionali.

In particolare, tra le varie competenze istituzionali, si ricorda che:

- l'Agenzia Interregionale per il Fiume Po è l'unica responsabile per quanto riguarda il Servizio di Piena di cui al R.D. 2669/1937 e la Polizia Idraulica di cui al R.D. 523/1904, e loro modificazioni e integrazioni, sui tronchi fluviali con opere idrauliche classificate in I, II, e III cat. nonché degli interventi anche urgenti o di emergenza da effettuarsi sulle medesime opere o su opere ad esse strettamente connesse;
- le Regioni sono responsabili, sulla base degli avvisi di criticità emessi dai corrispondenti Centri Funzionali, del coordinamento di tutte le attività di Protezione Civile e dei rapporti con le autorità locali nel medesimo ambito, oltre che del collegamento con il Dipartimento Nazionale, in conseguenza degli eventi in atto, ai sensi della L. 225/1992 e s.m.i.;

- l'Autorità di Bacino del Fiume Po partecipa alle attività del Centro Operativo in quanto responsabile, ai sensi della L. 183/89 e s.m.i., di tutte le attività di pianificazione di bacino precedenti e successive gli eventi in corso.

## 8 SPECIFICHE TECNICHE E MODALITÀ DI ESECUZIONE

Il sistema sarà perfettamente integrato o integrabile con gli analoghi dispositivi di previsione e gestione delle piene fluviali già in dotazione di alcune Amministrazioni, tra le quali l'ARPA Piemonte per quanto attiene alle previsioni idrologiche e idrodinamiche sulla parte superiore del bacino e relativa asta fluviale di Po, A.I.PO per quanto riguarda l'asta principale dello stesso fiume Po. Requisito essenziale è anche quello di utilizzare precedenti studi e applicazioni di modelli di simulazione idrologica-idrodinamica, resi disponibili dall'Autorità di Bacino del fiume Po. Infine, saranno acquisiti anche i dati di previsione meteorologica messi a disposizione dei Centri Funzionali delle Regioni del bacino.

A tal riguardo, ARPA-SIM della Regione Emilia-Romagna possiede da tempo alcuni modelli idrologici e idrodinamici che sono attualmente impiegati in modalità di tempo reale ai fini previsionali. In particolare, ARPA SIM possiede una modellistica afflussi-deflussi di tipo distribuito applicata su tutti gli affluenti di destra del fiume Po e sul fiume Reno, mentre una ulteriore modellistica afflussi-deflussi a parametri concentrati è applicata al bacino idrografico del torrente Parma. Due sono invece i modelli idrodinamici applicati rispettivamente all'asta principale del fiume Po e al reticolo minore dei torrenti Parma e Baganza.

Nel complesso si tratta di catene modellistiche operative di previsione numerica idrologica e idraulica ancora frazionate, tra loro non consistenti e ancora in larga massima in fase di sperimentazione e soggette ad una costante attività di sviluppo e miglioramento prestazionale.



## 9 PROGRAMMA TEMPORALE E COSTI DI REALIZZAZIONE E DI ESERCIZIO DEL SISTEMA

La stima dei costi riguarda sia le spese da sostenere per lo sviluppo, la realizzazione e la prima implementazione della catena di modellistica numerica, sia le spese necessarie alla gestione e manutenzione (anche evolutiva) del sistema stesso, oltre all'aggiornamento professionale del personale per renderlo compiutamente capace di un adeguato impiego del sistema previsionale.

### *9.1 Personale*

Il personale indicato per la gestione operativa presso la sede di Parma sarà addestrato secondo uno specifico programma che prevederà una prima fase di affiancamento al gruppo di lavoro sul progetto, nel corso dell'allestimento e della calibrazione del modello off-line e on-line, una serie di lezioni di base sul sistema e l'assistenza on-the-job per la gestione del sistema di previsione dopo l'impianto del sistema presso il Centro Operativo di Parma, in un ambiente caratterizzato da ritmi e cadenze tipiche di un Centro Funzionale.

### *9.2 Attivazione del Centro Operativo e implementazione dei modelli*

Il sistema di previsione, messo a punto, calibrato e testato con le modalità descritte nei paragrafi precedenti, verrà attivato presso il Centro Operativo di Parma, procedendo a tutte le verifiche di funzionalità necessarie per garantirne l'operatività ed affidabilità in tempo reale, in particolare quelle relative alla funzionalità di comunicazione tra i sistemi di reti di monitoraggio e di interfaccia con i sistemi già operativi in altre Regioni, p.es. Piemonte, Lombardia e Emilia-Romagna.

Il dispositivo modellistico on-line, allestito con le modalità descritte nei paragrafi precedenti, sarà attivato e testato sugli stessi eventi di prova del modello off-line, eseguendo i necessari adattamenti nella calibrazione di base conseguenti alle differenziazioni introdotte nella schematizzazione del modello e nella rappresentazione degli elementi fisici.

Saranno svolti specifici programmi di simulazione, attivando tutti i dispositivi di interfaccia, di elaborazione e diffusione degli output, ed inoltre eseguite prove relative a manovre o alla simulazione di situazioni critiche, nell'ambito delle procedure previste per il supporto alla gestione degli eventi di piena.

I risultati delle elaborazioni specificate nelle attività precedenti saranno diffusi, con le modalità stabilite successivamente, mediante la pubblicazione dei dati di previsione su

pagine web protette, ovvero a mezzo di procedure alternative automatiche o attivabili dai responsabili del Centro Operativo di Parma.

I dati verranno elaborati per eseguire i confronti con i parametri di sicurezza idraulica, per la costituzione dei bollettini di allertamento e per la visualizzazione georiferita (aree esondate), grafica (idrogrammi, profili) e tabellare a supporto delle valutazioni di gestione dei fenomeni di piena previsti.

### 9.3 Attività di carattere ordinario (aggiornamento rilievi, scale di deflusso, modelli, ...)

Il sistema previsionale sarà soggetto ad opportuni interventi di adattamento e miglioramento, ritenuti necessari in base alle risultanze della sperimentazione su eventi reali, con riferimento alla schematizzazione modellistica, alla calibrazione, ai moduli di supporto per l'input e post processamento dei dati.

In particolare, il sistema informativo di base sarà mantenuto aggiornato provvedendo alla verifica e aggiornamento delle scale di deflusso secondo i criteri dettati dalla pratica specialistica e dalla normativa in materia.

### 9.4 Tempi di esecuzione

La creazione del sistema di previsione è costituito dai componenti sotto specificati.

1. Progettazione del sistema
2. Studi idraulici di base
3. Allestimento dispositivo modellistico off-line
4. Acquisizione dei dati delle stazioni in telemisura
5. Allestimento dispositivo modellistico on-line

Nella tabella successiva si riporta il crono-programma per la realizzazione del sistema di previsione, riferito ai diversi componenti.

Tempo in giorni	0	240	480	720	960			
	120	360	600	840	1080			
A – Progettazione	■							
B – Studi di base	■	■						
C – Modellistica off-line		■	■					
D – Modellistica on-line			■	■				
E – Trasferimento/esercizio			■	■	■	■	■	■
			1° anno	2° anno	3° anno			

Al termine di ciascuna fase sarà presentato al Gruppo di Coordinamento Unificato un dettagliato rapporto comprendente lo stato di avanzamento della realizzazione e la rendicontazione dei risultati conseguiti, oltre che specificatamente l'evidenziazione di ogni possibile criticità e relativa proposta di soluzione.

Con uguale cadenza si terrà una riunione tecnica a scopo di coordinamento.