

3.4 La previsione delle piene

3.4.1

I processi di formazione delle piene

Il dominio di studio dell'idrologia tecnica è rappresentato dal bacino idrografico, sistema costituito da quella porzione di territorio il cui suolo e sottosuolo convogliano l'afflusso idrico che li interessa in una data sezione di chiusura, individuata normalmente come sezione trasversale di un corso d'acqua.

I processi di formazione delle portate idriche dei corsi d'acqua possono essere classificati dal punto di vista teorico in idrologici ed idraulici. I primi comprendono tutti i meccanismi di trasformazione dell'afflusso al bacino idrografico in portata immessa nel reticolo idrografico, i secondi il trasferimento di tale portata all'interno dei singoli alvei e nella rete idrografica nel suo complesso.

I meccanismi idrologici riguardano molteplici processi di interazione tra suolo, sottosuolo, vegetazione e atmosfera. Questi definiscono i flussi di massa d'acqua, illustrati in **figura 3.4.1**, e di energia dall'atmosfera verso il bacino idrografico e viceversa, così come fra le diverse componenti del bacino medesimo.

Per quanto riguarda i flussi di massa, gli afflussi al sistema dall'esterno sono costituiti principalmente dalle precipitazioni meteoriche in fase liquida, cui si deve aggiungere il contributo della massa liquida proveniente dalla fusione nivoglaciale; in particolari contesti si deve inoltre tenere conto della condensazione diretta del vapore acqueo come rugiada o galaverna. Tale afflusso idrico successivamente si ripartisce in diversi altri flussi interni al bacino stesso subendo numerose trasformazioni.

Una parte degli afflussi non intercettata dalla vegetazione che giunge alla superficie del suolo, si infiltra nel sottosuolo mentre una parte defluisce in superficie fino a raggiungere il corso d'acqua. Ancora, una parte del flusso infiltrato nel primo strato

di terreno raggiunge il corso d'acqua filtrando nel terreno saturo e/o insaturo come deflusso ipodermico, l'altra parte percola nell'acquifero sottostante, o falda, che, a propria volta, interagisce con il reticolo idrografico di fondovalle e di pianura, producendo deflusso profondo e portata nel corso d'acqua, detta *portata di base*, ovvero drenando portata dal corpo idrico.

Non tutta la massa che affluisce al bacino si trasforma in portata: una parte degli afflussi ritorna in atmosfera prima di giungere al reticolo per evaporazione dal suolo o tramite traspirazione dalla vegetazione, oppure evapora direttamente dalle superfici dei corpi idrici.

I processi evapotraspirativi dipendono fortemente dalla dinamica dei flussi di energia in ingresso: fra questi la radiazione solare a onde corte incidente al suolo rappresenta il principale contributo in ingresso al sistema idrologico, cui si sommano i flussi energetici a onde lunghe da e verso l'atmosfera. Inoltre l'evapotraspirazione risente della disponibilità idrica nel suolo ed anche delle condizioni degli strati di atmosfera prossimi al suolo:

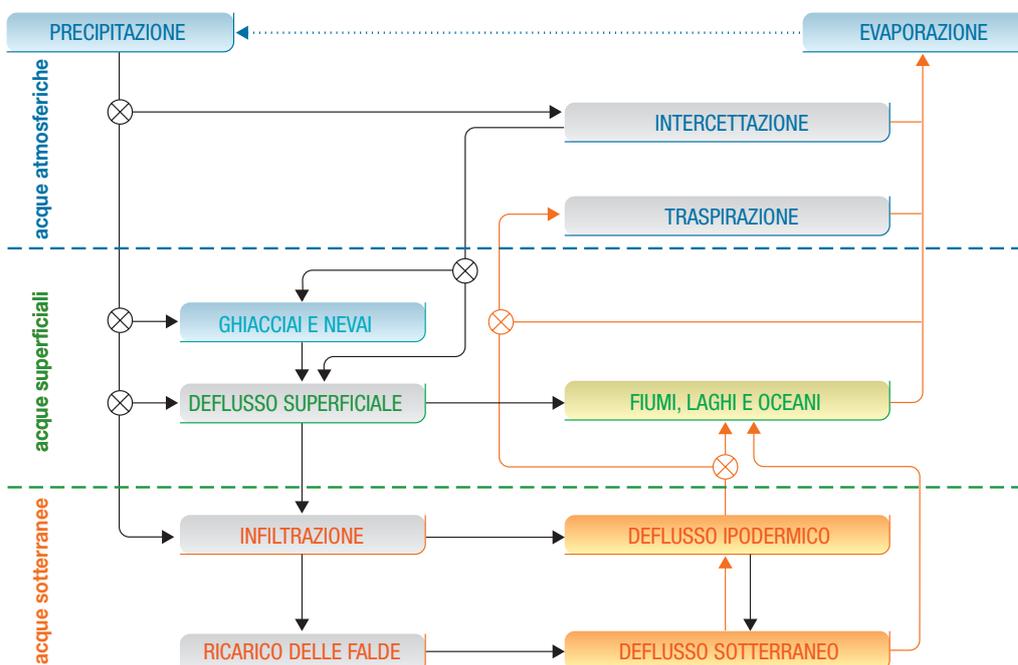


Figura 3.4.1
Schema
del ciclo idrologico

umidità dell'aria e ventilazione costituiscono importanti fattori predisponenti o inibenti. Tutto ciò rende l'interazione tra suolo e atmosfera estremamente complessa (Penman, 1948; Priestley & Taylor, 1972).

Le varie componenti fin qui brevemente descritte hanno pesi diversi in funzione dello specifico regime idrologico d'interesse. Nell'idrologia di piena solo i fenomeni dalla dinamica veloce risultano significativi alla scala temporale dell'evento della piena medesima (ore o giorni): il ramo di crescita ed il colmo sono dovuti essenzialmente al deflusso superficiale mentre il deflusso ipodermico influenza principalmente il ramo discendente dell'idrogramma ma può così incidere sulla dinamica delle piene immediatamente successive.

L'influenza del deflusso superficiale cresce al diminuire delle dimensioni dei bacini, divenendo cruciale nelle piene improvvise dei piccoli bacini, note in letteratura come *flash floods*; viceversa il deflusso ipodermico condiziona la dinamica di piena in modo crescente al crescere delle dimensioni del bacino. Nell'analisi dei fenomeni di magra, che definiscono la curva di durata delle portate determinando la risorsa idrica effettivamente disponibile nel dato bacino, ci si riferisce invece alla formazione della portata di base che a sua volta deriva dall'interazione con i sistemi di falda: tali interazioni hanno dinamiche molto lente (mesi o anni) e dipendono fortemente dai flussi evapotraspirativi.

Nello studio dei fenomeni di piena, molta attenzione deve quindi essere posta alla corretta identificazione dei processi dalla dinamica veloce che determinano la formazione dei deflussi superficiali e ipodermici: fra questi l'infiltrazione e la filtrazione sono i più importanti aspetti da rappresentare attraverso opportuna modellazione.

Una descrizione fisica del processo è teoricamente possibile riferendosi agli studi relativi al moto dell'acqua nei mezzi porosi, anche se questo impone di caratterizzare le proprietà idrauliche del mezzo, in questo caso del suolo, valutandone, in primo luogo, la permeabilità e la capacità di ritenzione. Tali capacità generalmente non sono costanti, ma dipendono dallo stato del contenuto idrico del suolo stesso rendendo il fenomeno altamente non lineare (Richards, 1931; Brooks & Corey, 1964, 1966; Van Genuchten, 1980). Quindi il fenomeno particolarmente complesso per essere descritto e costringe di fatto ad apportare semplificazioni analizzando il processo integrato almeno alla scala di particella di suolo.

In più, tali caratteristiche idrauliche sono difficilmente misurabili sia in laboratorio sia in campo e soprattutto presentano un'elevata variabilità spaziale, sia planimetrica sia sul profilo verticale (Santini *et al.*, 1995), comportando ulteriori approssimazioni quando il processo deve essere studiato alla scala del bacino idrografico, che invece rappresenta la scala d'interesse per le piene.

Comunemente si adottano due approcci complementari che stanno alla base dei diversi modelli descrittivi del processo dell'infiltrazione. In un caso, i meccanismi di rifiuto della precipitazione da parte del terreno vengono legati all'eccessiva intensità della precipitazione medesima che supera la capacità di assorbimento del suolo (Horton, 1933). Le caratteristiche principali del suolo che determinano questo meccanismo sono riassunte nella curva di permeabilità che descrive come varia la permeabilità del suolo in funzione del suo grado di saturazione; questa è fortemente legata sia al tipo di suolo, in particolare alla tessitura, sia all'uso del suolo stesso, cioè alla presenza di materia organica o di apparati radicali.

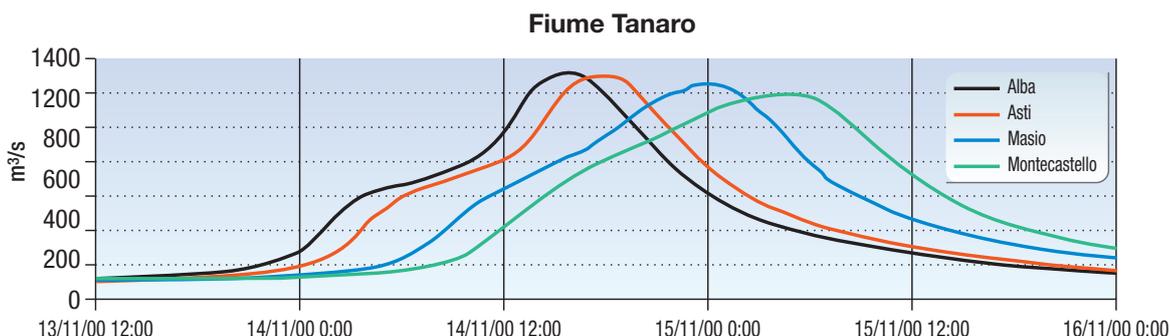
Nell'altro caso i meccanismi di rifiuto della precipitazione da parte del terreno vengono legati allo stato di progressiva saturazione del suolo che via via non consente ulteriore assorbimento (Dunne, 1978). In questo caso le caratteristiche del suolo predominanti risultano essere riassunte dalla struttura e dalla porosità che quantifica i volumi idrici che il suolo stesso può trattenere. In ogni caso risulta evidente che per descrivere correttamente il processo di infiltrazione è necessario definire in modo appropriato le caratteristiche del suolo, la loro variabilità spaziale e contemporaneamente la variabilità spaziale della precipitazione che innesca il processo.

Il primo approccio ben si presta a descrivere le piene originate da piogge brevi ed intense, il secondo meglio spiega l'effetto di piogge prolungate. Non mancano ovviamente modelli in cui sono sviluppati entrambi gli approcci al fine di poter gestire entrambe le tipologie di evento.

In particolare il territorio del Piemonte è caratterizzato da una elevata variabilità sia dal punto di vista del territorio fisico sia da quello climatico che impone l'analisi del processo di formazione a diverse scale temporali. La catena alpina con le maggiori cime e profonde valli è caratterizzata da piccoli bacini con regimi idrologici nivo-glaciali e nivopluviali, con piene improvvise dovute a fenomeni temporaleschi estivi e spesso causa di forte trasporto solido.



Figura 3.4.2
Esempio di laminazione
dell'onda di piena
lungo l'asta
del Fiume Tanaro



Nella zona prealpina, dove le valli alpine confluiscono nei maggiori fondivalle e i bacini hanno dimensione maggiore e regime decisamente pluviale, le piene tipicamente primaverili e autunnali sono causate da precipitazioni prolungate. Tuttavia, fenomeni convettivi ed elevate intensità di precipitazioni si verificano spesso a causa della risalita orografica delle correnti umide mediterranee: data la forte presenza antropica esse possono spesso risultare estremamente rischiose. La formazione delle onde di piena in questi bacini assume fondamentale importanza per determinare la piena nel reticolo idrografico principale. In questo caso, oltre alla simulazione del processo di infiltrazione, è basilare la corretta quantificazione della quota oltre la quale la precipitazione assume forma nevosa non producendo così deflusso immediato. Infine le zone collinari e di pianura sono caratterizzate dalla maggiore concentrazione delle precipitazioni nel periodo autunnale in cui le piene sono spesso legate alla saturazione dei suoli.

Al contrario, i processi idraulici riguardano principalmente la propagazione della portata nel corso d'acqua e la determinazione dei tiranti idrici e della velocità della corrente. I tempi di trasferimento delle onde di piena nei diversi rami costituiscono una variabile fondamentale in quanto oltre a determinare il tempo di arrivo del picco di piena, influenzano lo sfasamento delle onde degli affluenti e quindi anche la forma dell'onda ed il valore al colmo dei corpi idrici ricettori. In particolare nella propagazione delle piene nei reticoli naturali risulta di fondamentale importanza tenere conto principalmente di due fenomeni che concorrono a modificare in modo significativo la traslazione delle onde di piena alla scala del reticolo: la laminazione dell'onda e l'influenza dei profili di rigurgito.

Con il termine *laminazione* si indica il fenomeno di progressiva riduzione del colmo dell'onda di piena durante la traslazione della stessa lungo il corso d'acqua. Tale fenomeno è dovuto alla dinamica del progressivo invaso dei volumi idrici nell'alveo e viene correttamente descritto nelle equazioni di idrodinamica. Questo fenomeno è tanto più evidente quanto più gli alvei divengono larghi e poco pendenti ed è quindi molto importante in tutte le porzioni di pianura dei corsi d'acqua regionali (un esempio è riportato in **figura 3.4.2**).

Il fenomeno del *rigurgito* si manifesta a causa dell'innalzamento dei tiranti idrici dovuto a livelli idrici particolarmente elevati a valle e viene descritto implicitamente dalle equazioni del moto. Questi innalzamenti sono generalmente dovuti alla confluenza in un corso d'acqua anch'esso in piena ovvero all'innalzamento dei livelli in concomitanza di notevoli restringimenti dell'alveo sia naturali sia antropici. In presenza di rigurgito l'andamento del livello idrometrico non rispecchia il relativo andamento delle portate provocando il permanere di un livello elevato anche quando le portate in alveo diminuiscono (un esempio è riportato in **figura 3.4.3**).

Di nuovo questo fenomeno è significativo soprattutto in pianura dove in particolari condizioni topografiche il rigurgito può essere risentito per molti chilometri a monte. In particolare, nella rete idrografica piemontese, i rigurgiti sono importanti in corrispondenza di tutte le confluenze in Po: ad esempio quelle della Dora Baltea, del Sesia, del Tanaro, dello Scrivia; della confluenza in Tanaro della Stura di Demonte, del Belbo e della Bormida; della confluenza dell'Orba in Bormida e della confluenza del Toce in Verbanò.

Inoltre l'effetto del rigurgito può assumere occasionalmente e localmente grande importanza in corrispondenza di strutture come i ponti, le cui luci subiscono forti variazioni di sezione a causa di occlusioni dovute al trasporto solido e quindi provocare intensi ed improvvisi fenomeni di esondazione. Tali fenomeni sono spesso legati all'idrologia dei versanti e rappresentano un ulteriore stretto legame tra fenomeni idrologici e fenomeni idraulici. In questo caso la difficoltà che si incontra nella corretta previsione dell'esondazione è legata all'estrema difficoltà di prevedere l'occasionalità delle cause che determinano il rigurgito.

Per concludere è importante sottolineare che numerosi altri fenomeni possono interagire con la naturale propagazione della piena e produrre estese esondazioni come ad esempio le rotte arginali o l'occlusione dell'alveo a causa di frane o smottamenti. Anche in questo caso la difficoltà di previsione è legata all'impossibilità di prevederne le cause. Tali fenomeni devono per questo essere considerati fuori linea nel momento della definizione degli scenari di rischio.

3.4.2 I modelli di previsione

I fattori principali che determinano la scelta dei modelli matematici utilizzabili per costruire un sistema di previsione delle piene dei corpi idrici superficiali sono molteplici. Pertanto la scelta delle tipologie modellistiche utilizzabili non è univoca e deve essere valutata attraverso un'analisi multi-obiettivo che tenga conto delle esigenze e delle potenzialità dei singoli modelli, in termini di dati occorrenti e di precisione dei risultati.

In particolare è fondamentale analizzare il territorio che si vuole modellare da un punto di vista geomorfo-climatico e quindi definire i processi fisici prevalenti che condizionano la dinamica della piena nelle sezioni fluviali di interesse e la relativa scala spazio-temporale di riferimento.

Inoltre è necessario e fondamentale valutare quali risposte deve poter fornire il sistema di simulazione ed i relativi tempi di calcolo, in funzione delle esigenze di tipo operativo relative alle azioni preventive che si possono intraprendere a valle dell'allertamento, per mitigare l'esposizione e la vulnerabilità del territorio.

3.4.2.1

I modelli idrologici di formazione del deflusso superficiale

In generale i fenomeni di tipo idrologico sono di fondamentale importanza per studiare le piene dei bacini idrografici montuosi di piccole dimensioni dalla dinamica estremamente rapida (piccola scala: superficie minore di 100 km² e tempi di risposta minore di 3-6 ore; media scala: superficie minore di 1'000 km² e tempi di risposta minore di 18-24 ore). In questo tipo di studio è necessario poter considerare accuratamente, con particolare attenzione alla marcata variabilità spazio-temporale, tutti i processi che concorrono alla trasformazione dell'afflusso meteorico in deflusso nella rete idrografica (Siccardi, 1995; Barbero *et al.*, 2002).

In letteratura sono presenti innumerevoli modelli utilizzabili per la simulazione dell'infiltrazione superficiale, della filtrazione profonda, del deflusso sui versanti e di quello ipodermico. In generale, ancora prima di entrare nel merito del singolo modello analizzandone le equazioni ed i metodi numerici utilizzati per risolverle, esercizio spesso complesso che esula dagli obiettivi del presente capitolo, è opportuno classificare i modelli secondo alcune categorie tipicamente utilizzate in idrologia.

Sulla base delle equazioni risolte nel codice di calcolo, si distinguono *modelli fisici*, basati sulla descrizione accurata dei diversi processi alla scala spaziale e temporale adeguata; *concettuali*, basati su approssimazioni della dinamica dei fenomeni attraverso similitudini con sistemi più semplici; *empirici*, basati sull'uso di equazioni ricavate

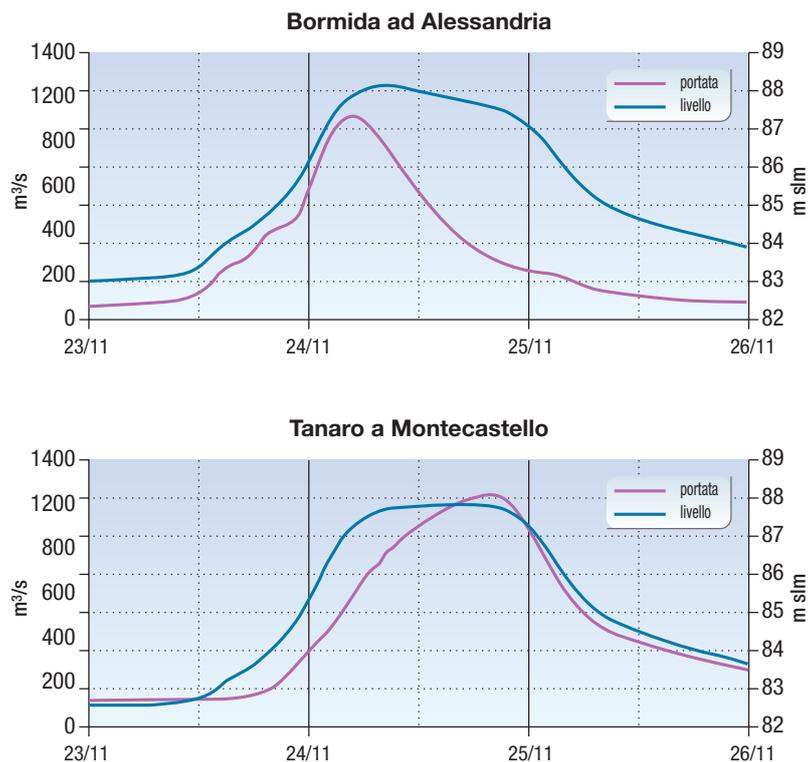


Figura 3.4.3
Figurigo dei livelli del Torrente Bormida ad Alessandria causati della piena del Fiume Tanaro. Il livello idrico del Bormida si mantiene elevato, condizionato dal livello in Tanaro, mentre le portate diminuiscono rapidamente

dall'interpretazione diretta di evidenze sperimentali. In questo caso la complessità è maggiore per modelli fisici e via via inferiore per quelli concettuali ed empirici ed è legata alla soluzione numerica delle equazioni: la scelta di equazioni più semplici porta generalmente ad aumentarne la parametrizzazione e quindi la necessità di taratura.

Si distinguono inoltre modelli *concentrati*, in cui i processi sono risolti ad una scala integrale molto maggiore di quella propria, generalmente si utilizza l'intero bacino idrografico come unità di base, o *distribuiti*, dove le unità di base sono le parcelle di suolo di grandezza opportuna. In questo caso la maggiore complessità dei modelli distribuiti è legata al fatto che la più fine risoluzione spaziale del modello consente di per sé una maggiore accuratezza nella descrizione fisica dei fenomeni e comporta in generale un elevato costo computazionale.

Infine, relativamente alla descrizione del ciclo idrologico, si considerano modelli a simulazione continua in cui i diversi processi sono simulati nella loro dinamica complessiva riproducendo l'intero ciclo idrologico per lunghi periodi e rappresentano tutte le componenti da quelle superficiali a quelle di falda e quindi determinando direttamente istante per istante lo stato idrologico del bacino. A questi modelli complessi si affiancano diverse semplificazioni legate allo studio delle piene, detti anche *ad evento*, limitando la descrizione agli aspetti del ciclo idrologico che hanno maggiore influenza sulla formazione della piena: alcuni modelli studiano i deflussi superficiale ed ipodermico e trascurano le dinamiche della per-

colazione e le oscillazioni di falda, altri ancora simulano unicamente il deflusso superficiale e considerano come perdita le precipitazioni che si infiltrano nel suolo. Questa schematizzazione consente generalmente di avere un modello più semplice che però di contro necessita di conoscere o ipotizzare lo stato di imbibimento iniziale dei suoli che condiziona fortemente il processo di infiltrazione (figura 3.4.4).

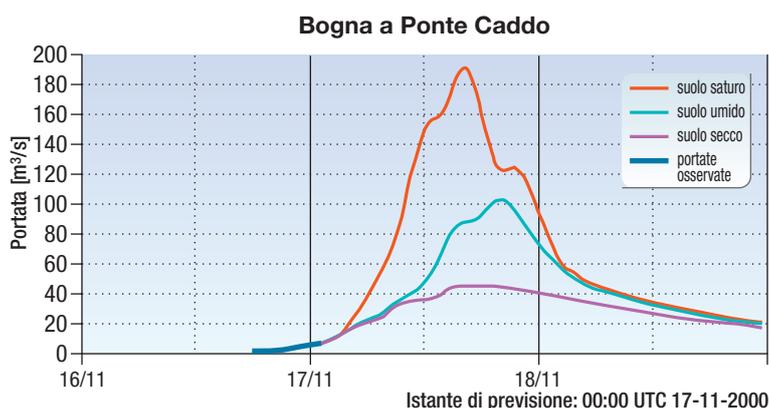


Figura 3.4.4
Influenza delle condizioni iniziali sulla previsione di piena in un piccolo bacino

In generale i modelli a simulazione continua comportano una maggiore complessità in quanto richiedono la simulazione dell'intero ciclo idrologico su lungo periodo; tuttavia la scelta di un modello ad evento può essere legata non tanto alle esigenze di semplificazione, ma alla necessità di studiare con accuratezza i processi principali che determinano le piene isolandoli dal contesto del ciclo idrologico complessivo sfruttando la diversa scala temporale di questi. In questo caso le semplificazioni introdotte risultano spesso assolutamente trascurabili.

L'analisi comparata di vantaggi e svantaggi offerti da ciascuna tipologia è ampiamente documentata in letteratura (Chow *et al.*, 1988).

3.4.2.2

I modelli idrodinamici di propagazione della piena

I fenomeni di tipo idraulico sono determinanti nello studio della rete idrografica di fondo valle e di pianura caratterizzata da bacini di grosse dimensioni e tempi di risposta più lunghi (grande scala: superficie maggiore di 1'000 km² e tempo di risposta maggiore di 1 giorno) (Barbero *et al.*, 2002). In questo caso la letteratura propone un limitato numero di possibili approcci. Ciò è sostanzialmente dovuto al fatto che il fenomeno fisico del moto dei fluidi viene descritto in modo molto accurato dalle equazioni di Stokes. Nella trattazione delle piene fluviali, in particolare, tali equazioni vengono semplificate nelle equazioni di De Saint-Venant considerando che il moto delle correnti idriche naturali è assolutamente turbolento e sfruttando l'ipotesi di mono-dimensionalità o bidimensionalità del moto. La caratteristica che distingue mag-

giormente questa tipologia di modelli è il metodo numerico di soluzione delle equazioni di base che ne determina il costo computazionale, la stabilità e l'accuratezza.

I modelli idraulici hanno prestazioni fortemente condizionate dalla qualità dei rilievi topografici disponibili. In generale per quanto riguarda i modelli di tipo mono-dimensionale, la descrizione geometrica delle sezioni fluviali è facilmente ottenibile da rilievi topografici specifici, mentre il parametro di scabrezza deve essere calibrato sulla base della simulazioni di eventi storici.

3.4.2.3

La catena previsionale idro-meteorologica

L'insieme dei dati relativi alle forzanti meteorologiche osservate e previste, con i vari trattamenti necessari dei modelli idrologici e di quelli idraulici, costituisce la cosiddetta catena previsionale idro-meteorologica.

I dati idrometrici in tempo reale sono il punto di partenza per una previsione della propagazione delle piene nei grandi corsi d'acqua (bacini a grande scala e lunghezza dell'asta dell'ordine delle centinaia di chilometri) basata su modelli idraulici. In questo caso i tempi di traslazione delle onde di piena nel reticolo fluviale sono sufficientemente elevati per consentire un adeguato anticipo previsionale. Queste applicazioni sono consolidate nella letteratura scientifica e tecnica con numerosi esempi operativi. La conoscenza precisa della geometria degli alvei fluviali consente generalmente di ottenere previsioni ad elevata precisione.

Le osservazioni meteorologiche in tempo reale consentono, attraverso modelli idrologici e idraulici, di effettuare previsioni sul reticolo idrografico dei bacini di media scala; in questo caso, l'utilizzo di previsioni meteorologiche a breve e medio termine, consente di aumentare l'anticipo previsionale a fronte di una minore accuratezza del sistema dovuta all'incertezza delle previsioni meteorologiche. L'interazione tra idrologia e meteorologia nella previsione degli eventi estremi è attualmente un ambito di ricerca applicata che da alcuni anni trova molto spazio nella comunità scientifica. Gli esempi di applicazione non sono numerosi sia nella letteratura sia nella realtà operativa (WMO, 2002).

Infine, le informazioni che provengono dai radar meteorologici e dalle previsioni meteorologiche a brevissimo termine risultano di particolare importanza in quanto i tempi caratteristici di formazione della piena nei piccoli bacini montani sono tali da non consentire sufficiente preavviso alla popolazione; in questo caso le incertezze legate alla previsione meteorologica si sommano a quelle della modellistica idrologica ad alta risoluzione, pertanto i risultati devono essere attentamente analizzati. Queste applicazioni rappresentano un

campo di ricerca applicata molto avanzata, con esempi disponibili che nella grande parte sono allo stadio di prototipi.

In ogni caso, il punto cruciale nella gestione di una catena operativa previsionale è quello relativo alla necessità di tenere conto che le previsioni fornite dalle simulazioni modellistiche delle piene fluviali non sono esatte bensì affette da notevoli incertezze. Queste essenzialmente sono dovute: all'utilizzo delle previsioni meteorologiche, alla stima della condizione iniziale di imbibimento del suolo, alle approssimazioni implicite nella modellazione idrologica e idraulica. Tali incertezze producono inevitabilmente fallanze nel sistema di previsione, con mancati e falsi allarmi, pertanto, per una corretta gestione degli allertamenti, devono essere quantificate direttamente dal modello di simulazione in modo oggettivo ovvero nel sistema di previsione delle piene tramite l'analisi della previsione da parte di un esperto.

La previsione deterministica

Si parla di previsione deterministica quando il modello numerico non tiene conto direttamente dell'incertezza delle stime prodotte, cioè tratta le variabili che descrivono l'evoluzione del sistema in modo deterministico; questo significa che una volta date le condizioni iniziali e note le forzanti al sistema, la soluzione fornita dal modello è unica e determinata. La propagazione delle incertezze presenti nelle tre componenti ora citate, forzanti, condizioni iniziali e al contorno, ai valori di portata nel reticolo non viene perciò quantificata.

Quando le incertezze presenti sono accettabili, come nel caso della previsione idraulica a breve termine, la simulazione deterministica non necessita di interpretazione. Al contrario, quando il peso delle incertezze aumenta, come nella previsione idrologica a medio-lungo termine, solo un'analisi del comportamento e della precisione del modello nell'utilizzo operativo sugli eventi passati consente di interpretare le simulazioni numeriche da parte di un esperto alla luce della situazione in atto e di emettere previsioni qualitative relative alla magnitudine dei fenomeni di piena.

La previsione probabilistica

Per superare i limiti di una previsione qualitativa e soggettiva, si rende indispensabile la quantificazione dell'incertezza della previsione in modo oggettivo e quantitativo. Questo si ottiene utilizzando modelli capaci di gestire nella soluzione delle equazioni variabili di tipo aleatorio e fornendo soluzioni in termini probabilistici, cioè specificando la probabilità che una certa variabile, ad esempio la portata in una determinata sezione, sia superiore ad un valore fissato di pericolo.

Dal punto di vista applicativo, la complessità di un modello capace di caratterizzare l'intera distribuzione di probabilità della soluzione risulta

spesso tale da non poter affrontare lo studio in questi termini. In generale si utilizzano modelli che si limitano a determinare i momenti del secondo ordine, o varianza, di questa distribuzione. Questa rappresenta un indice dell'affidabilità della soluzione e fornisce un intervallo di confidenza entro il quale le previsioni possono variare. Tuttavia anche in questo caso il ruolo del previsore esperto non viene eluso in quanto l'interpretazione della soluzione alla luce dell'allertamento necessita comunque di un'analisi attenta.

Alternativamente una metodologia operativa, semplice da realizzare ma efficace, per ottenere una stima dell'attendibilità della previsione si basa sull'ipotesi che la maggiore fonte di incertezza sia legata alla previsione meteorologica ed è quella di utilizzare diverse corse del modello idrologico-idraulico con diversi scenari pluvio-meteorologici per la successiva verifica della variabilità delle portate previste. In questo modo il previsore ha una stima indiretta dell'incertezza e può ponderare meglio la sua previsione qualitativa.

3.4.2.4

Il modello operativo in Piemonte

Il Sistema Informativo di Previsione delle Piene (SIPP) attualmente operativo è stato messo a punto, verificato e validato nel corso dei Progetti Interreg IIC e IIIB per rispondere alle esigenze delle attività di allertamento del Centro Funzionale.

L'obiettivo del SIPP è quello di prevedere in tempo reale le portate ed i relativi livelli lungo tutto il reticolo idrografico principale del Piemonte, ai fini della valutazione del rischio.

Il cuore del sistema di previsione e gestione delle piene è costituito da un software, chiamato FLOOD WATCH (letteralmente *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 ESRI® ArcView. La previsione delle portate fluviali (non solo delle piene, in quanto il sistema si riferisce anche ai regimi ordinari) è effettuata attraverso l'applicazione di una serie di modelli numerici che, in base ai dati di *input* costituiti dalle osservazioni della rete idro-meteorologica, 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);
- 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 un'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 fase di esaurimento delle piene e garantisce le portate fluviali in tempo di deflussi medi e di magra. La **figura 3.4.5** illustra la concettualizzazione del ciclo idrologico adottata nel modulo RR.

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

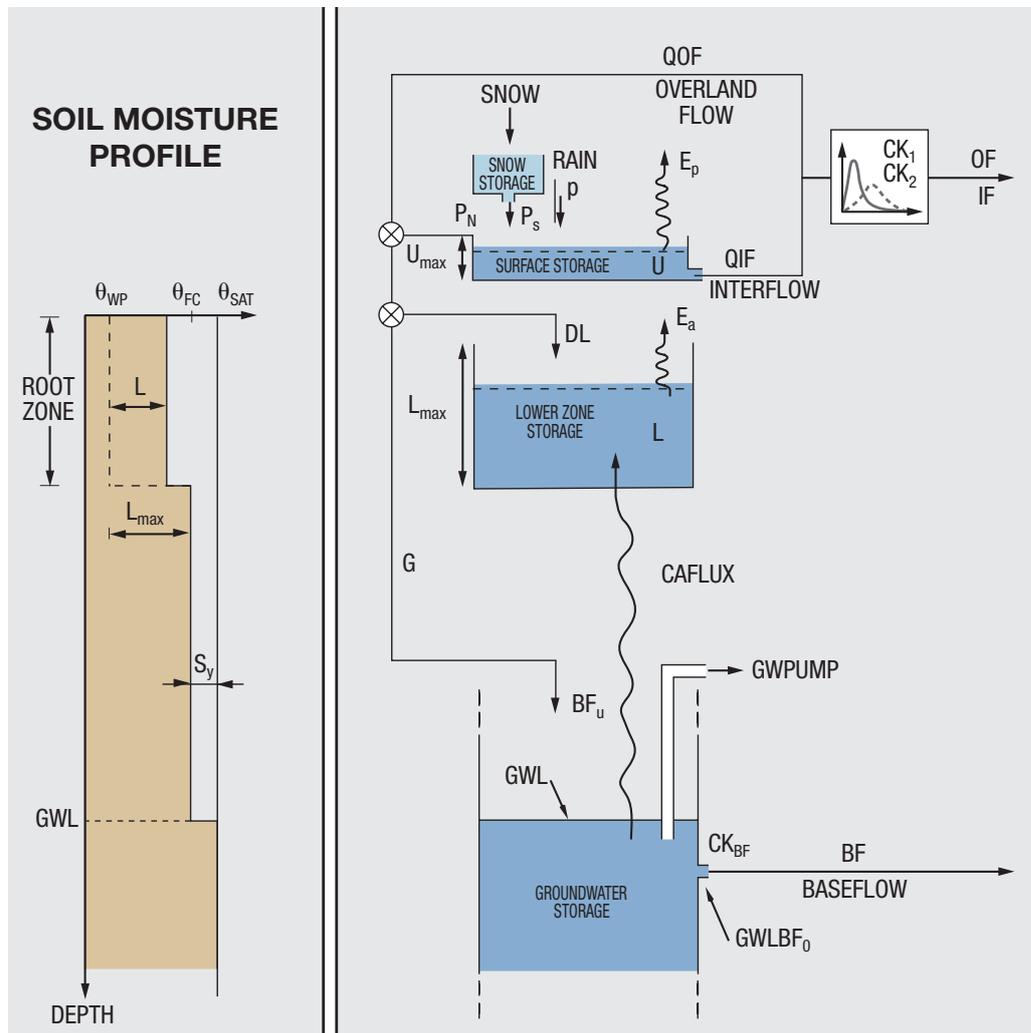


Figura 3.4.5
 Concettualizzazione
 del ciclo idrologico
 adottata nel modulo RR

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 Saint-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 idro-meteorologica automatica in tempo reale del Piemonte integrata con la rete della Valle d'Aosta, della Liguria e del Cantone Svizze-

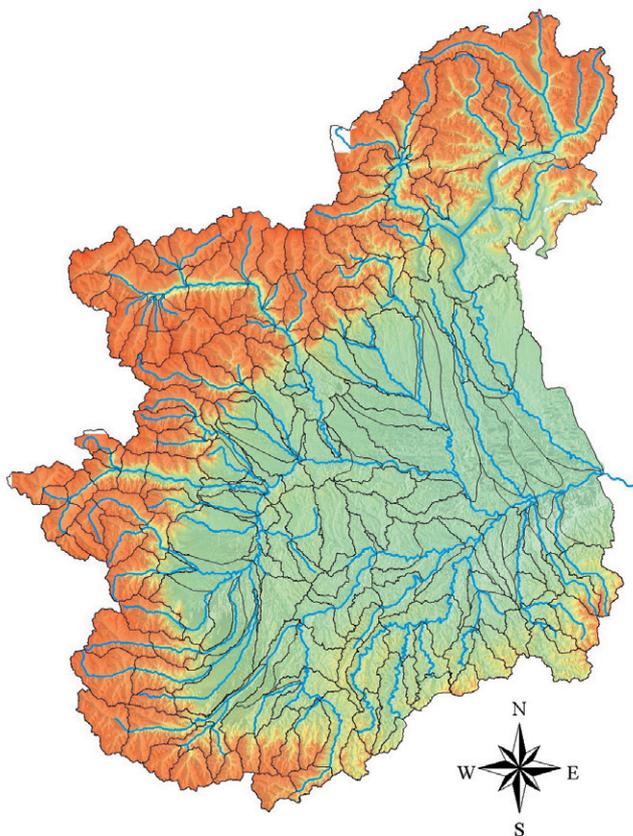


Figura 3.4.6
Struttura del modello.
In evidenza la partizione
del bacino in sottobacini
unitari ed il reticolo
idrografico simulato

TABELLA 3.4.1 SEZIONI FLUVIALI ANALIZZATE NELL'ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEL MODELLO

FIUME	SEZIONE FLUVIALE	AREA DEL BACINO [km ²]	TEMPO DI CORRIVAZIONE [h]
Po	Cardè	510	7.7
	Carignano	3'976	18.0
	Torino	5'362	23.8
	Crescentino	13'230	27.0
	Isola Sant'Antonio	25'857	44.4
	Becca	36'770	51.9
Chisone	San Martino	581	6.0
Banna	Santona	361	18.3
Dora Riparia	Susa	827	6.3
Stura di Lanzo	Lanzo	580	5.5
Orco	Cuornè	630	5.8
Dora Baltea	Tavagnasco	3'313	11.6
	Borgosesia	696	7.0
Sesia	Palestro	2'587	18.8
	Serravalle	619	10.0
Tanaro	Piantorre	499	9.0
	Farigliano	1'508	14.8
	Alba	3'379	17.8
	Masio	4'534	25.3
Stura di Demonte	Montecastello	7'994	36.4
	Fossano	1'249	9.5
Belbo	Castelnuovo	422	15.1
Bormida	Mombaldone	392	12.2
	Cassine	1'521	23.2
Orba	Casalcermelli	798	14.2
Toce	Candoglia	1'475	9.0
Diveria	Crevoladossola	321	3.8

ro del Ticino con una consistenza di circa 350 stazioni di misura pluvio-termometriche (densità media di una stazione ogni 100 km²) 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 3'500 km. I punti di controllo, costituiti dalla rete regionale di monitoraggio idrometrico, consistono in un centinaio di stazioni distribuite su tutto il reticolo.

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 6 ore, per un orizzonte previsionale di 48 ore. In **tabella 3.4.1** sono riportate le sezioni per cui sono state eseguite le analisi delle prestazioni del modello.

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 fare questo si utilizzano sia le osservazioni delle stazioni meteorologiche, sia le previsioni meteorologiche fornite da diversi modelli, ad esempio il modello del centro meteo-

rologico europeo (ECMWF), il modello operativo ad area limitata italiano (LAMI) ed una sua versione sperimentale ad alta risoluzione (s4) (Hydroptimet, 2004). L'esempio del caso studio dell'evento del novembre 2002 rappresenta un utile riferimento in cui si sono verificate le prestazioni della catena previsionale.

Come mostrato in **figura 3.4.7**, per sintetizzare i risultati delle simulazioni del modello idrologico forzato con differenti previsioni quantitative di precipitazione, sono stati definiti un errore relativo (3.4.1) e un indice di anticipo normalizzato che tiene conto dell'anticipo della previsione, intervallo tra l'istante di previsione (*TOF*) e l'istante di piccolo *T(Qmax)* e del tempo di corrivazione dei singoli bacini (*Tc*) (3.4.2)

$$error = \frac{Q_{forecast} - Q_{observed}}{\max(Q_{observed})} \quad (3.4.1)$$

$$i_a = \frac{T(Q_{max}) - TOF}{Tc} \quad (3.4.2)$$

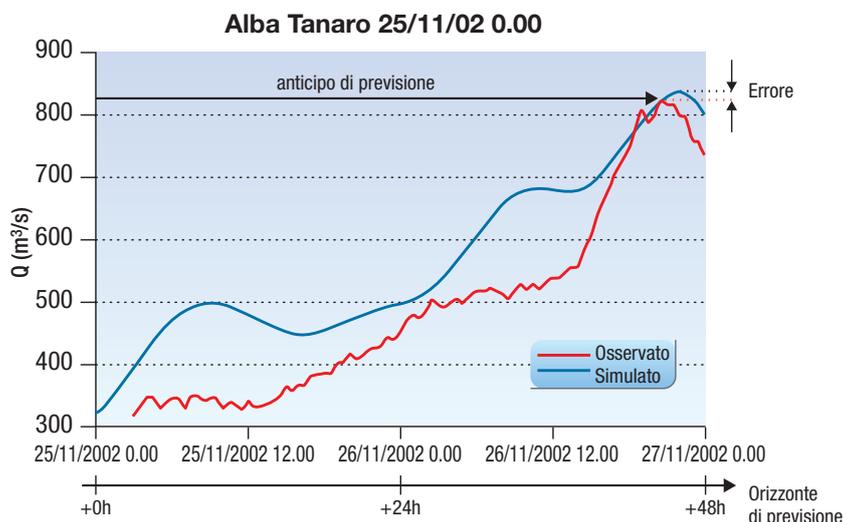
In **figura 3.4.8** sono riportati i risultati delle simulazioni considerando l'errore, come sopra definito, in relazione all'indice normalizzato. Come si può notare la sottostima della portata prevista non è strettamente legata all'anticipo della previsione a causa dell'importanza degli errori delle previsioni meteorologiche.

Nella **tabella 3.4.2** sono riportati i risultati delle simulazioni in termini di errore medio e di deviazione standard. L'errore nella previsione della portata risulta quasi sempre negativo evidenziando così la tendenza a sottostimare; la previsione ottenuta con i dati di pioggia osservata (previsione perfetta) mostra in entrambi i casi il minimo errore medio. Quella ottenuta con le previsioni di pioggia da modello globale (ECMWF) mostra l'errore maggiore confermando la difficoltà della loro applicabilità alla scala dei bacini in esame.

Dal punto di vista operativo è fondamentale capire quanto l'errore nella previsione della portata influenzi il sistema di allertamento e quindi la corretta gestione dell'emergenza in termini di falsi o mancati allarmi. Infatti su ciascuna sezione viene prevista una portata che, confrontata con dei valori soglia, definisce il livello di rischio atteso. Sono stati calcolati gli indici statistici *Threat Score* e *BIAS* (Murphy & Winkler, 1997) sulla base dei mancati e falsi allarmi generati dalla catena idrometeorologica durante le simulazioni dei due eventi considerati come casi studio. La **tabella 3.4.3** riporta i risultati ottenuti.

I risultati evidenziano la difficoltà di una buona previsione su bacini di estensione medio-piccola come quelli colpiti dagli eventi presi in esame: si può inoltre notare come la previsione migliori, nel

Figura 3.4.7
Confronto tra previsione e osservazione per il Fiume Tanaro ad Alba



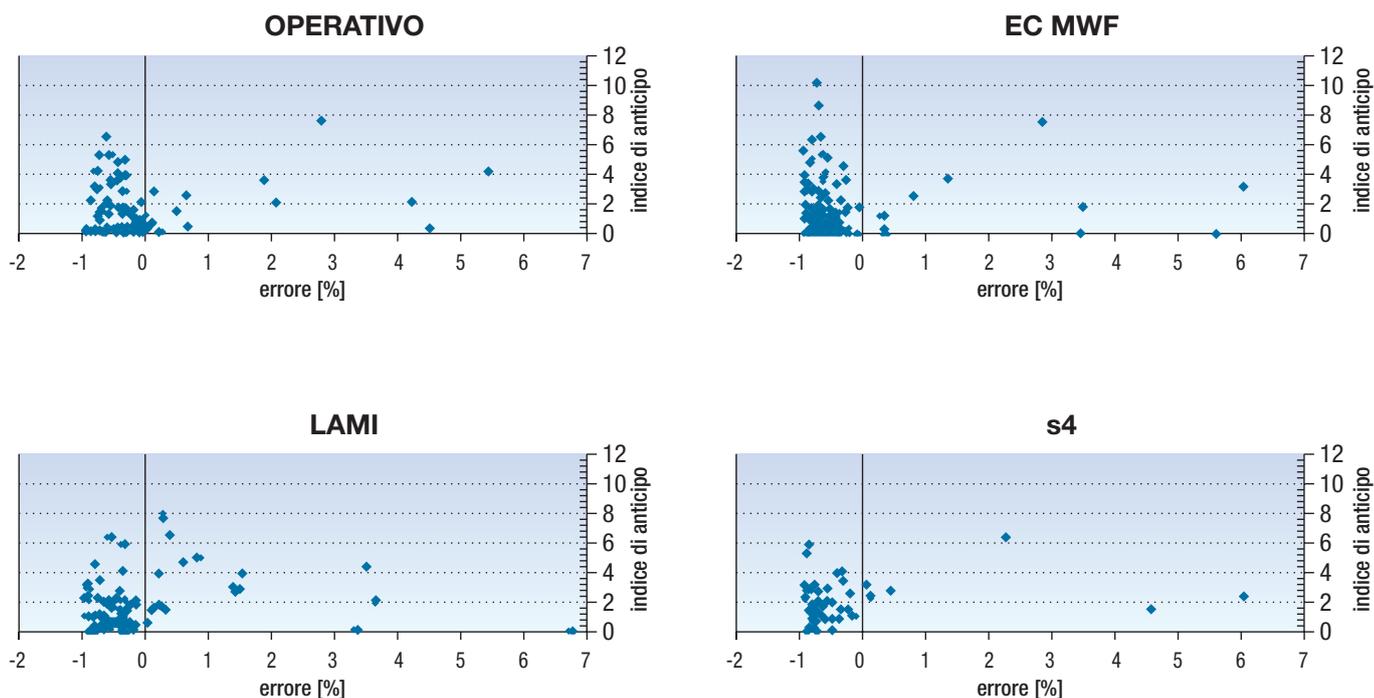


TABELLA 3.4.2 SINTESI DEGLI ERRORI DI PREVISIONE DI PORTATA

MODELLO METEOROLOGICO	EVENTO 14-16/11/2002		EVENTO 23-25/11/2002	
	ERRORE MEDIO	DEVIAZIONE STANDARD	ERRORE MEDIO	DEVIAZIONE STANDARD
previsione perfetta	-0.01	1.10	0.04	0.46
operational	-0.14	1.03	-0.03	0.57
ECMWF	-0.31	1.15	-0.28	0.41
LAMI	-0.27	1.12	-0.18	0.62
s4	-0.29	1.26	-0.16	0.44

TABELLA 3.4.3 PRESTAZIONI DEL SISTEMA DI ALLERTAMENTO

MODELLO METEOROLOGICO	EVENTO 14-16/11/2002		EVENTO 23-25/11/2002	
	TS	BIAS	TS	BIAS
previsione perfetta	0.15	0.15	0.33	0.33
operational	0.46	0.46	0.00	0.00
ECMWF	0.00	0.00	0.00	0.00
LAMI	0.13	0.50	0.13	0.50
s4	0.08	0.08	0.25	0.25

Figura 3.4.8
Errori normalizzati
di previsione in relazione
all'indice di anticipo

caso del modello operativo, per gli eventi di più lunga durata, questo perché in corso di evento le elaborazioni dei meteorologi per la stima della pioggia prevista sono supportate dai dati osservati.

L'analisi dei due casi studio conferma, da una parte, che l'utilizzo della previsione quantitativa della precipitazione da modelli globali come forzante per la previsione delle portate su bacini di piccole e medie dimensioni produce errori significativi, dall'altra che, per tali bacini, il modello idrologico in sé presenta incertezze dovute alla semplificazione dei processi fisici e alle condizioni iniziali.

Le incertezze presenti, ovviamente, provocano anche una diminuzione dell'affidabilità del sistema di allertamento in termini di previsione delle piene. Tuttavia, almeno per questi casi studio, l'emissione di mancati e falsi allarmi non è strettamente legata all'entità dell'errore nella previsione. Gli sforzi futuri saranno rivolti a sviluppare e migliorare i modelli numerici, ma anche all'utilizzo di una previsione di tipo probabilistico della portata.

3.4.3 Il radar meteorologico nella previsione delle piene improvvise nei piccoli bacini

3.4.3.1 L'osservazione e il *nowcasting* radar meteorologico

Il radar meteorologico è uno strumento per l'osservazione delle nubi e delle precipitazioni. L'onda elettromagnetica emessa dal radar sotto forma di impulsi viene retrodiffusa dalle nubi che costituiscono il bersaglio meteorologico. La misura della potenza e della fase (*radar Doppler*) della radiazione ricevuta permette di caratterizzare la natura del bersaglio meteorologico. In particolare la misura di potenza, che viene quantificata per mezzo dell'unità logaritmica dBZ, risulta legata alla quantità d'acqua presente nella nube, mentre la misura della fase permette di ricavare un'informazione legata alla velocità di spostamento della nube.

Non effettuando il radar una misura diretta di parametri meteorologici, per ottenere informazioni di maggiore utilità in ambito idro-meteorologico è necessaria l'applicazione di opportuni algoritmi: per questa ragione si parla ad esempio di *stima* radar della precipitazione.

Il campo elettromagnetico generato dal radar è normalmente polarizzato sul piano orizzontale. Negli ultimi anni sono stati realizzati e resi commercialmente disponibili sistemi che permettono di variare il piano di polarizzazione dell'onda trasmessa (radar polarimetrici). In particolare la trasmissione alternata di impulsi polarizzati orizzontalmente e verticalmente consente di ricavare informazioni più dettagliate sul bersaglio, rendendo possibile un'accurata distinzione tra echi meteorologici e non meteorologici e, tramite il riconoscimento della forma delle idrometeorie, l'identificazione del tipo di precipitazione. Infatti le gocce d'acqua, caratterizzate da una forma schiacciata dovuta al moto di caduta, retrodiffondono la radiazione radar maggiormente nel piano orizzontale, mentre la neve e la grandine, mediamente di forma sferica, retrodiffondono in modo simile nelle due polarizzazioni.

Arpa Piemonte gestisce il radar di Bric della Croce e, in collaborazione con Regione Liguria, il radar di Monte Settepani (Bechini & Cremonini, 2002). Entrambi i sistemi sono di tipo Doppler e polarimetrico ed inviano i loro dati in tempo reale al Centro Funzionale. Il radar di Bric della Croce si trova sulla sommità della collina torinese nel Comune di Pecetto (TO), mentre il radar di Monte Settepani è installato ad un'altezza di 1'400 m nel comune di Osiglia (SV).

L'elaborazione in tempo reale delle misure radar permette la stima di alcuni significativi parametri meteorologici sull'intero territorio regionale e la rea-

lizzazione di prodotti specifici per le attività di monitoraggio e previsione. Le più comuni applicazioni dei radar meteorologici sono:

- il monitoraggio in tempo reale di intensità di precipitazione, velocità del vento, presenza di grandine, entro un raggio di 120-150 km dal sito radar e con una definizione dell'ordine di 1 km²;
- le previsioni di piena; l'utilizzo congiunto dei radar e della rete di monitoraggio al suolo permette, attraverso una stima ottimale della quantità di precipitazione sull'intero territorio regionale, l'inizializzazione di modelli idrologici.
- le previsioni a brevissimo termine (fino a 3-6 ore) di fenomeni temporaleschi associati a precipitazioni intense, grandine, ecc.

Il radar, fornendo una misura continua sul territorio e con elevata frequenza temporale, è lo strumento che meglio si presta all'elaborazione di previsioni a breve termine, in particolare relativamente ai fenomeni convettivi.

Il termine *nowcasting* è utilizzato proprio per enfatizzare la breve scadenza della previsione, da 0 a 6 ore. Storicamente le attività di *nowcasting* si sono basate prevalentemente su tecniche di estrapolazione applicate a immagini radar e satellitari. Tali tecniche, utilizzate fin dagli anni Settanta, prevedono il calcolo della *cross-correlazione* tra immagini successive per l'identificazione della traiettoria dell'eco radar: si possono applicare sia a livello areale (Kessler, 1966), sia a livello di singola cella (Barklay & Wilk, 1970), nel qual caso viene preso come riferimento il centroide dell'eco.

Più recentemente sono stati sviluppati algoritmi sofisticati che permettono di gestire anche l'unione e la divisione di celle temporalesche (Dixon & Wiener, 1993).

Un approccio alternativo consiste nell'utilizzo di dati da modellistica numerica, eventualmente, come nel caso dell'algoritmo NIMROD del *Met Office* (Golding, 1998) congiuntamente a tecniche convenzionali di estrapolazione. Per i tempi di previsione brevi viene pesata maggiormente la parte di estrapolazione, mentre per tempi più lunghi acquista maggiore importanza la dipendenza dal modello. Per periodi superiori a 6 ore il metodo è quasi completamente dipendente dal modello.

3.4.3.2 Modelli idrologici ad alta risoluzione

Per la gestione del rischio idrogeologico, le stime di precipitazione da radar sono utilizzate come forzante in un modello idrologico distribuito. Come già detto, in un bacino idrografico la trasformazione degli afflussi (precipitazioni meteoriche) in deflussi (portate alla sezione di chiusura), è regolata da un insieme complesso di fenomeni fisici. La loro modellazione matematica completa richiederebbe l'uso di un gran numero di equazioni differenziali

e la conoscenza esatta di tutte le grandezze in gioco. La modellistica idrologica distribuita (Abbot *et al.*, 1987; Beven, 1985; Rosso, 1994) supera tali difficoltà riproducendo l'effettiva dinamica dei diversi processi idrologici descrivendoli alla scala delle varie componenti elementari in cui viene discretizzato. L'alta risoluzione spaziale deriva dalle dimensioni della cella elementare in cui si suddivide la superficie del bacino che operativamente può essere di 1'000 m, 100 m o anche 10 m per i bacini più piccoli: il limite alla risoluzione non è legato alla struttura del modello piuttosto alla scarsità di informazioni territoriali ed è imposta dai limiti delle capacità di elaborazione dei calcolatori elettronici. L'alta risoluzione spaziale consente implicitamente una migliore descrizione temporale della dinamica dei fenomeni, ciò offre inoltre la possibilità di descrivere accuratamente i diversi processi e la loro variabilità spazio-temporale.

All'interno di ciascuna cella le proprietà topografiche idrologiche ed idrauliche sono ipotizzate continue ed omogenee in modo da permettere la parametrizzazione delle equazioni dei singoli processi fisici per la cella in esame e di valutarne poi gli effetti complessivi in termini di portata alle sezioni del reticolo idrografico. Di norma, nelle pratiche applicazioni, si fa uso di una scomposizione del bacino di tipo *raster*, ottenuta suddividendo l'area di interesse in celle elementari di forma rettangolare. Questo porta all'analisi del processo integrale introducendo ipotesi e semplificazioni ad un livello più o meno spinto.

L'approccio distribuito ha inoltre il grande vantaggio di permettere lo studio contemporaneamente sia dell'intero bacino sia delle sue componenti parziali in quanto il modello fornisce informazioni sull'evoluzione dei fenomeni in ogni punto del dominio.

Appare evidente che l'uso di un modello di tipo distribuito richiede l'acquisizione di una grossa quantità di dati: il numero totale dei parametri in gioco è infatti dato dal numero delle grandezze utilizzate per descrivere la singola cella elementare, moltiplicato per il totale delle celle presenti. Anche il peso computazionale del modello è quindi gravoso: si deve simulare, per ogni passo di calcolo, il funzionamento di tutte le celle presenti. Per contro, tale onere viene ripagato da una più accurata descrizione dei fenomeni, soprattutto dal momento che è stato evidenziato (Beven, 1985; Rosso, 1994) come la variabilità spaziale dei processi in gioco (assorbimento, propagazione, ecc.) abbia grande influenza sulla risposta del bacino.

La fase di taratura, inoltre, è maggiormente controllabile, dato che i parametri hanno un significato fisico ben preciso: oscillano, quindi, in un intervallo di valori noti. In più si sottolinea che solo una piccola parte di essi saranno effettivamente parametri da calibrare, mentre la gran parte sono dati direttamente misurabili sul campo (quote, pendenze, ecc.).

3.4.3.3

Utilizzo operativo e accuratezza dei risultati

Il sistema di previsione delle piene improvvisate, basato sulla modellistica idrologica distribuita e la stima delle forzanti tramite radar meteorologico, è attualmente operativo sul territorio regionale solo su alcuni bacini campione ed è finalizzato ad una analisi delle prestazioni di un tale dispositivo. L'obiettivo è di capire i vantaggi che una previsione a brevissimo termine possa avere nella migliore gestione delle emergenze.

Il modello utilizzato per la stima della formazione della piena e della propagazione dell'onda di piena nel reticolo idrografico è il FEST (Mancini *et al.*, 2000; Ravazzani *et al.*, 2002), messo a punto presso il Politecnico di Milano. È costituito da una serie di moduli che simulano le varie componenti del ciclo idrologico. La sua prerogativa è quella di lavorare su base GIS secondo uno schema distribuito che permette di considerare la variabilità spazio-temporale dei processi idrologici quali quello dell'evaporazione, della precipitazione, dell'infiltrazione, della fusione nivale e della propagazione lungo la rete di drenaggio superficiale e sotterranea. Il modello risolve il sistema di equazioni del bilancio di massa e del bilancio di energia e permette di lavorare in continuo e per evento utilizzando, per ciascuno dei processi idrologici esaminati, moduli specifici in modo da scegliere quelli che meglio interpretano le diverse condizioni naturali che si vogliono rappresentare. In particolare in questa applicazione se ne utilizza una versione *ridotta ad evento*, in cui si simulano solo i processi che portano alla formazione di deflusso superficiale, in quanto ben rappresentativa della formazione delle piene dei piccoli bacini dove i deflussi di base risultano generalmente trascurabili ai fini della determinazione dell'onda di piena.

L'architettura del modello è costituita da due blocchi principali schematizzati in **figura 3.4.9**. Nel primo blocco viene elaborata l'informazione pluviometrica e valutata la risposta del suolo in termini di infiltrazione e deflusso superficiale per ciascuna cella. Il modello d'infiltrazione implementato è quello concettuale del SCS-CN molto utilizzato nelle applicazioni idrologiche (USDA, 1972, 1986). L'elaborazione pluviometrica, fornita alla scala puntuale dalle stime radar sul bacino è utilizzata come precipitazione distribuita sulle singole celle di calcolo. Nel secondo blocco, sono utilizzate le equazioni che descrivono la propagazione del deflusso superficiale sui versanti, nel reticolo idrografico alveato ed eventualmente attraverso gli invasi naturali e artificiali. La simulazione della propagazione del deflusso sui versanti è basata sul modello concettuale dell'invaso lineare mentre quella del deflusso alveato si basa sul modello Muskingum-Cunge a celerità variabile (Ponce, 1989). L'analisi del modello digitale del terreno permette di gene-



Figura 3.4.9
Schema dei processi descritti nella specifica applicazione del modello FEST

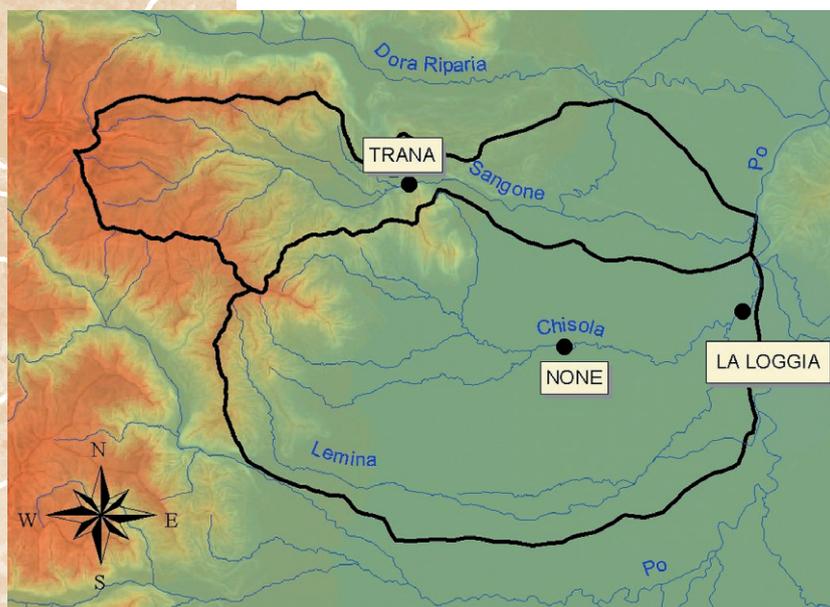
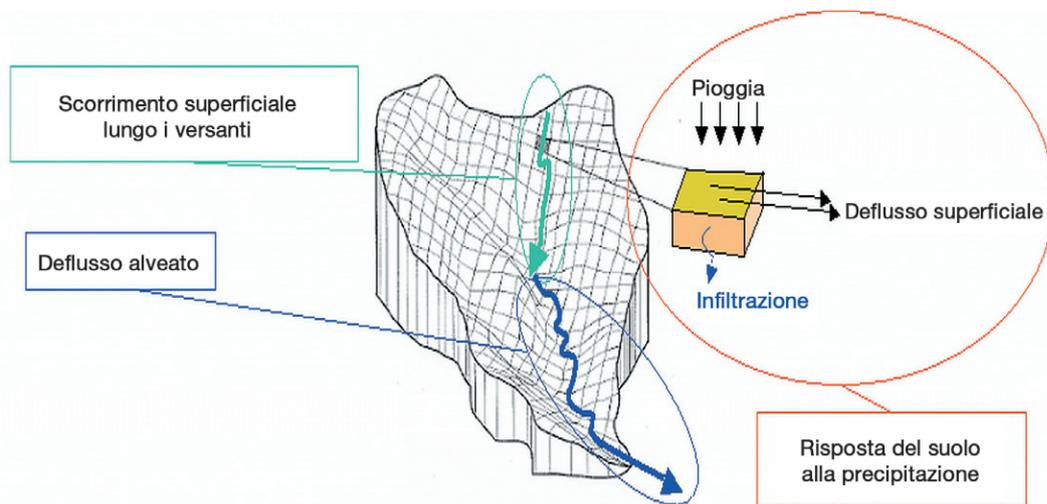


Figura 3.4.10
Corografia dei bacini utilizzati con, in evidenza, le sezioni considerate

rare in modo automatico il reticolo idrografico in base all'identificazione delle direzioni di scorrimento per ciascuna cella tramite il calcolo della direzione di massima pendenza ed alla definizione dei versanti e del reticolo alveato (Carrara, 1988; Tarboton, 1997). Quest'ultima distinzione è ottenuta stabilendo un'area di drenaggio minima oltre la quale le celle in cui è suddivisa la superficie del bacino si considerano appartenere al reticolo di drenaggio alveato.

Un esempio di applicazione del sistema accoppiato radar-modello idrologico è rappresentato dal caso di studio dell'evento del settembre 2002 nel Bacino del Torrente Chisola in cui, a causa di precipitazioni intense di origine convettiva si sono verificate estese esondazioni nel Comune di Nole. Tale evento è stato osservato in modo ottimale dal radar del Bric della Croce che dista solamente 30 km

dal centro di scroscio. Per l'analisi si sono considerati i bacini adiacenti del Torrente Chisola e del Torrente Sangone per cui si dispone di due stazioni di misura idrometrica, rispettivamente a Trana e a La Loggia. L'efficienza del sistema è stata valutata sulla base del confronto fra i risultati ottenuti dal medesimo modello idrologico utilizzando una prima volta i campi di precipitazioni stimati tramite radar e una seconda volta utilizzando campi ricostruiti a partire dalle registrazioni pluviometriche.

Il primo controllo riguarda il volume di piena calcolato nelle due simulazioni, sintetizzato in **tabella 3.4.4**. Il buon accordo tra i volumi osservati e simulati dall'utilizzo del radar sottolineano sia il buon andamento del modello idrologico sia consentono di affermare che le stime prodotte dal radar sono coerenti con le osservazioni a terra.

Il secondo controllo riguarda il confronto diretto fra gli idrogrammi di portata stimati dalle osservazioni idrometriche con quelli simulati dal modello idrologico. In questo caso si valuta la capacità del modello idrologico di rappresentare i diversi processi che concorrono alla formazione dell'onda di piena.

L'analisi dei risultati alla sezione di Trana (**figura 3.4.11-A**) mostra un buon comportamento di entrambe le simulazioni per quanto riguarda il primo colmo di piena mentre per il secondo colmo la simulazione con i dati radar mostra una leggera sovrastima. Per quanto riguarda i risultati relativi alla sezione di La Loggia (**figura 3.4.11-B**), si osserva come in entrambi i casi non si abbia una buona riproduzione dell'onda che risulta avere una maggiore durata ed un picco meno accentuato. Questo è dovuto al fatto che le esondazioni a Nole, che si trova a monte di La Loggia, producono una laminazione dell'onda che non può essere descrit-

TABELLA 3.4.4 VOLUMI DI PIENA: CONFRONTO TRA OSSERVAZIONI E SIMULAZIONI

BACINO	VOLUME DI PIENA [10^6 m^3]		
	OSSERVATO	SIMULATO TRAMITE RADAR	SIMULATO CON PLUVIOMETRI
Torrente Chisola a La Loggia	21.05	20.44 (errore -3%)	25.11 (errore +19%)
Torrente Sangone a Trana	2.33	2.11 (errore -9%)	2.34 (errore +2%)

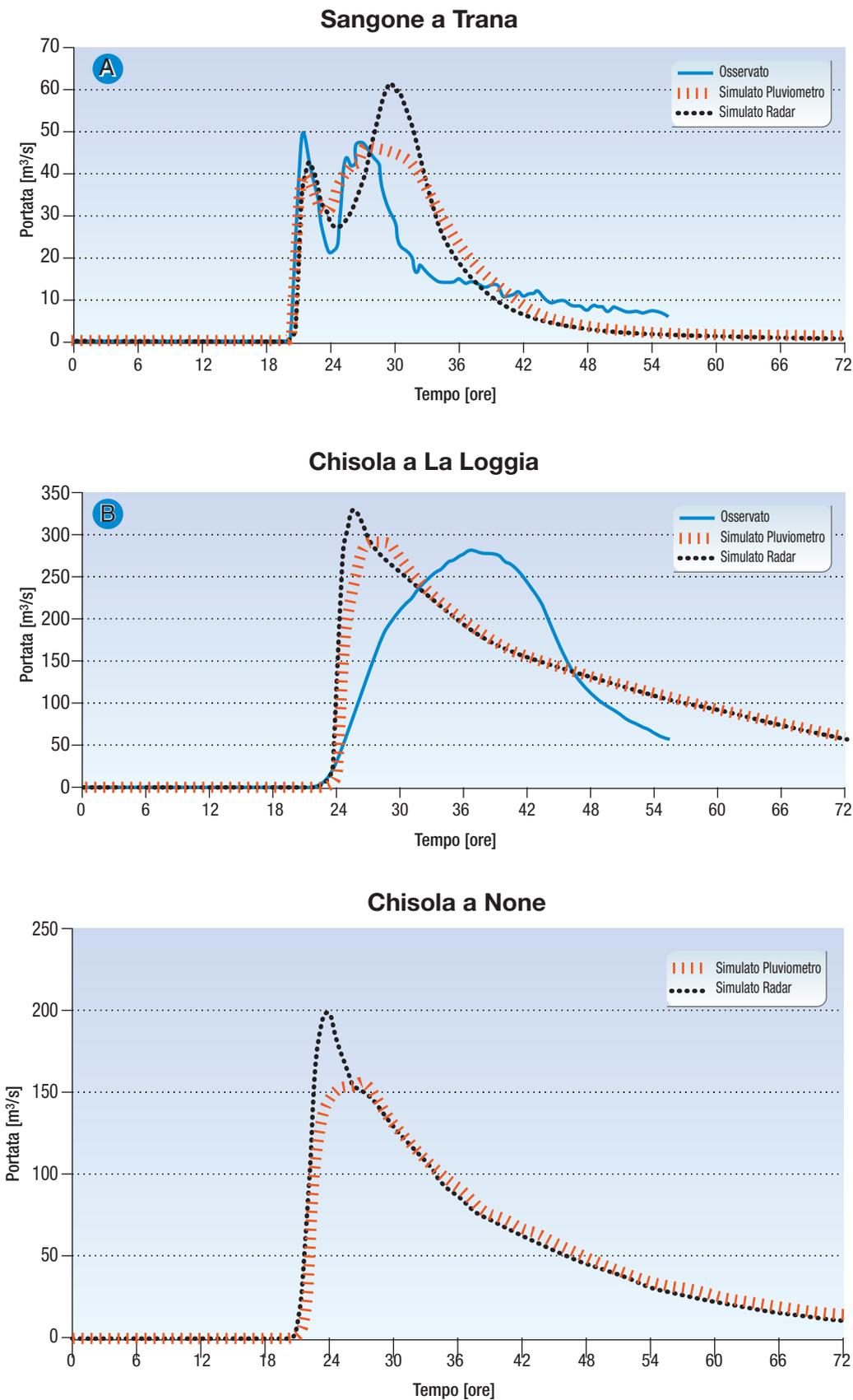


Figura 3.4.11
Idrogrammi osservati e simulati per il Torrente Sangone a Trana (A) e per il Torrente Chisola a La Loggia (B)

Figura 3.4.12
Idrogrammi osservati e simulati per il Torrente Chisola a None

ta dal modello. Le osservazioni in questa sezione non sono perciò molto rappresentative ai fini di una valutazione delle prestazioni del modello. Un'ulteriore verifica dei risultati può essere condotta in via qualitativa considerando la sezione immediatamente a monte di None, ciò è possibile grazie alle potenzialità del modello distribuito. In questo caso

non sono disponibili osservazioni dirette, tuttavia è nota la capacità di smaltimento dell'alveo in quella sezione che risulta pari a circa 150 m³/s. Come si nota in **figura 3.4.12**, la simulazione ottenuta sulla base dei dati radar supera notevolmente tale valore limite e porta correttamente alla previsione di una esondazione in quel tratto del cor-

so d'acqua, conclusione cui non si giunge considerando la simulazione basata sui dati pluviometrici tradizionali; ciò evidenzia l'importanza di un data ad elevata risoluzione spazio-temporale nell'analisi di fenomeni convettivi e dei loro effetti su bacini piccoli e medi.

Questo esempio mostra come il radar possa portare ad un netto miglioramento della capacità previsionale del modello idrologico. Tuttavia un utilizzo operativo di tale strumento risulta ancora poco affidabile a causa delle già descritte numerose fonti di errore che influiscono sulla stima della precipitazione.

A questo proposito sono attualmente in fase di sviluppo strumenti operativi che consentano di utilizzare congiuntamente la stima radar e le osservazioni pluviometriche a terra per la costruzione di campi di precipitazione tramite algoritmi di correzione e filtraggio (Cremonini *et al.*, 2004); questo consente di ottenere un prodotto molto robusto utile per una previsione idrologica operativa.

3.4.4

La gestione delle piene

Per una corretta gestione dei fenomeni di inondazione è necessario prevedere un'adeguata pianificazione d'intervento e disporre di un servizio di preannuncio che segnali con anticipo il verificarsi dei fenomeni di piena.

Le valutazioni dei campi di inondazione e del rischio connesso generalmente vengono condotte per un numero limitato di scenari e per ogni scenario i piani di emergenza definiscono le procedure di intervento da adottare (livelli di allerta). La previsione di piena a sua volta viene fatta definendo un numero limitato di classi di valutazione (livelli di criticità).

La correlazione di questi due livelli consente al sistema di protezione civile di attivare preventivamente quelle azioni che consentono di trovarsi pronti a fronteggiare le situazioni di emergenza. Questo significa che i piani di emergenza devono essere sviluppati in accordo con il sistema di allerta adottato.

Nel seguito viene presentato il servizio di preannuncio di Arpa Piemonte nel contesto nazionale ed i possibili utilizzi della cartografia relativa ai campi di inondazione, quale momento di raccordo fra la fase di valutazione e quella di previsione.

3.4.4.1

Il preannuncio

Le recenti disposizioni normative prevedono che le Regioni predispongano le attività necessarie alla prevenzione e riduzione del rischio idraulico, se del caso con il concorso del Dipartimento della Protezione Civile ed assolvono ad un adeguato governo delle piene, cui devono concorrere le attività di:

- preannuncio e sorveglianza poste in essere attraverso la rete dei Centri Funzionali;
- presidio territoriale idraulico attraverso adeguate strutture e/o soggetti;
- regolazione dei deflussi.

La gestione delle piene per eventi che coinvolgono bacini di interesse sovregionale che per la loro natura ed estensione comportino l'intervento coordinato di più amministrazioni competenti, deve passare attraverso accordi per la condivisione delle informazioni e dei dati, della previsione e della sorveglianza in tempo reale dei Centri Funzionali interessati.

In questo quadro, il servizio svolto dalla rete dei Centri Funzionali in tempo reale diventa di supporto per la gestione e si articola in tre fasi principali. La prima è quella previsionale, sostenuta da una adeguata modellistica numerica e consiste nella valutazione dei fenomeni meteorologici attesi, valutazione delle criticità attese, nonché degli effetti che tale situazione può determinare sull'integrità della vita, dei beni, degli insediamenti e dell'ambiente. La seconda fase è quella di monitoraggio e sorveglianza e comprende il monitoraggio strumentale dell'evento in atto ed osservazione qualitativa e quantitativa diretta e la sorveglianza delle situazioni impreviste e previsione a breve dei relativi effetti attraverso il *nowcasting* con l'ausilio di modelli inizializzati con misure raccolte in tempo reale. Infine la terza riguarda la valutazione delle criticità idrauliche dei corsi d'acqua principali.

Il Centro Funzionale del Piemonte, utilizzando i modelli idrologici ed idraulici disponibili ed in particolare il sistema informativo di previsione delle piene sopra descritto, valuta attraverso un servizio continuativo il rischio idraulico e, in caso di avviso di criticità idrogeologica ed idraulica, emette uno specifico bollettino di previsione delle piene il quale contiene una stima puntuale del livello previsto riferita ai corsi d'acqua principali. I livelli di criticità anche in questo caso sono ripartiti in tre classi: situazione ordinaria, piena ordinaria (livello 2) e piena straordinaria (livello 3).

Le previsioni delle portate sono attualmente operative relativamente a 24 sezioni significative. Nella **figura 3.4.13** è rappresentato un esempio del bollettino di previsione delle piene.

Il bollettino di previsione costituisce un complemento al bollettino idrogeologico ed idraulico e consente di specificare se e dove il pericolo legato a situazioni meteorologiche avverse può coinvolgere il reticolo idrografico principale. Durante i maggiori fenomeni di piena, possono poi essere fornite informazioni aggiuntive ed aggiornamenti con previsioni a medio-breve termine.

Infine, per la gestione di eventi di interesse sovregionale ed in particolare che interessano l'intera

asta del Fiume Po, sono stati posti in essere una serie di iniziative che garantiscono la condivisione delle informazioni e delle previsioni su tutto il bacino. L'accordo del 13/03/2002 tra le Regioni del Bacino del Po definisce un sottoinsieme delle reti idro-meteo-pluviometriche regionali quale rete fiduciaria alla scala di bacino e costituisce un Comitato Interregionale del Po con il compito di coordinare e sovrintendere al corretto ed efficiente scambio dei dati di monitoraggio tra le Regioni e lo Stato.

La convenzione del 16/02/2005 tra i Centri Funzionali delle Regioni Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Emilia Romagna, Veneto, il Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, l'Autorità di Bacino del Po e l'Agenzia Interregionale per il Fiume Po prevede poi la realizzazione di un sistema di modellistica idraulica per la previsione e controllo delle piene fluviali dell'asta principale del Fiume Po e l'istituzione di un Centro Operativo che elabora le proprie valutazioni utilizzando in ingresso le previsioni delle piene fornite da ogni singolo Centro Funzionale Regionale.

In questo modo, sfruttando in particolare i sistemi previsionali già in uso, attraverso la sinergia delle varie strutture sarà possibile giungere in tempi relativamente brevi a fornire anche un adeguato supporto allo svolgimento del servizio di Piena di tutta l'asta arginata di Po.

3.4.4.2

La valutazione del rischio idraulico per i piani di emergenza

Il Regolamento regionale di programmazione e pianificazione delle attività di protezione civile, approvato con Decreto del P.G.R. 18/10/2004 n. 7/R, prevede la predisposizione dei piani di emergenza provinciali e dei piani di protezione civile comunali o intercomunali.

Compito fondamentale delle Istituzioni, in materia di protezione civile, è la tutela dell'integrità della vita, dei beni e dell'ambiente inteso in senso lato, rispetto all'eventualità dell'insorgenza di un potenziale evento calamitoso.

Una conoscenza approfondita dell'assetto del territorio, delle sue tendenze evolutive, nonché delle condizioni di criticità è, dunque, di grande importanza strategica per la definizione degli strumenti di programmazione e pianificazione di protezione civile.

Le responsabilità derivanti dalle disposizioni di legge in materia, nonché un livello sempre crescente di sensibilità e consapevolezza della classe amministrativa, evidenziano l'importanza che rivestono gli Enti Locali nell'ambito delle attività di previsione e prevenzione dei rischi.

Predisporre un piano di protezione civile significa, quindi, per un Amministratore Locale, la possibilità di avvalersi di un utile strumento di supporto alle decisioni in fase di emergenza ma anche l'op-



Bollettino di Previsione delle Piene Regione Piemonte

Bollettino n° 07/04 di giovedì 04/11/2004 ore 14:00

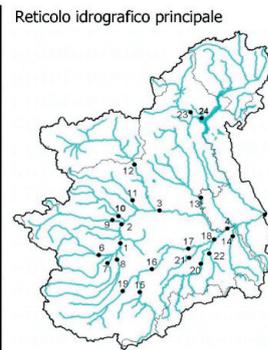
Fine validità: venerdì 05/11/2004 ore 24

Aggiornamento: venerdì 05/11/2004 ore 14

CRITICITA' IDRAULICA PREVISTA			
Bacino	Corso d'acqua	Sezione	Livelli di criticità
Po	1 - Po	Carignano	1
	2 - Po	Torino - Murazzi	1
	3 - Po	Crescentino	1
	4 - Po	Isola S. Antonio	1
	5 - Po	Ponte Becca	1
	6 - Pellice	Villafranca	1
	7 - Varaita	Polonghera	1
	8 - Maira	Racconigi	1
	9 - Dora Riparia	Torino	1
	10 - Stura di Lanzo	Torino	1
	11 - Orco	S. Benigno	1
	12 - Dora Baltea	Tavagnasco	1
	13 - Sesia	Palestro	1
	14 - Scrivia	Guazzora	1
Tanaro	15 - Tanaro	Farigliano	1
	16 - Tanaro	Alba	1
	17 - Tanaro	Masio	1
	18 - Tanaro	Montecastello	1
	19 - Stura di Demonte	Fossano	1
	20 - Belbo	Castelnuovo	1
	21 - Bormida	Cassine	1
	22 - Orba	Casal Cermelli	1
Verbano	23 - Toce	Candoglia	1
	24 - Lago Maggiore	Verbania	2

Note: Il Lago Maggiore permane ai livelli di attenzione anche se in calo.

Il documento è disponibile all'indirizzo www.rupar.piemonte.it/meteo/ oppure <http://intranet.ruparpiemonte.it/meteo/> con password di accesso



Per una corretta interpretazione consultare sempre il disciplinare

Legenda dei livelli di criticità	
1	Situazione Ordinaria
2	Piena Ordinaria
3	Piena Straordinaria

portunità di programmare le più adeguate politiche di mitigazione del rischio e di sviluppo e gestione del territorio.

Il regolamento prevede che i piani di emergenza contengano al loro interno la valutazione del rischio attraverso la predisposizione di scenari di rischio; per quanto riguarda il rischio idraulico, le metodologie per la valutazione dei campi di inondazione e costruzione delle carte del rischio sono state diffusamente descritte sopra.

Un esempio è dato dalla cartografia prodotta sul Fiume Sesia nell'ambito del Progetto Floodaware in cui sono stati costruiti due scenari di rischio direttamente correlati ai livelli di criticità del sistema di allerta regionale ovvero:

- *livello 2*, moderata criticità, che corrisponde ad una piena ordinaria definita come la portata che transita occupando interamente l'alveo del corso d'acqua con livelli prossimi a quelli del piano campagna o degli argini. Cominciano a diventare significativi i fenomeni di erosione delle sponde più vulnerabili ed iniziano ad essere inondate le aree prospicienti al corso d'acqua;
- *livello 3*, elevata criticità, che corrisponde ad una piena straordinaria definita come la portata che non può transitare contenuta nell'alveo e quindi determina gravi fenomeni di inondazione.

Figura 3.4.13 Bollettino di previsione delle piene



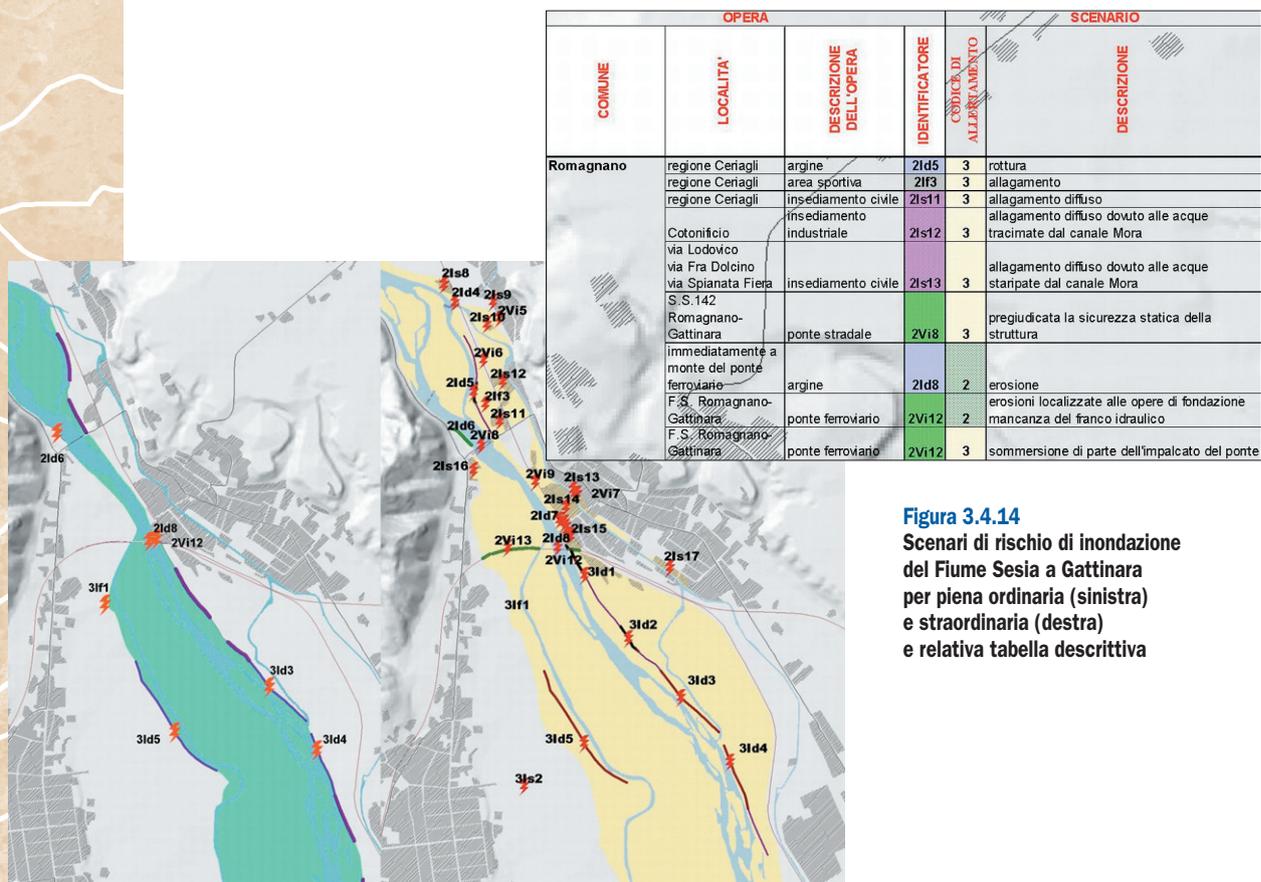


Figura 3.4.14
Scenari di rischio di inondazione del Fiume Sesia a Gattinara per piena ordinaria (sinistra) e straordinaria (destra) e relativa tabella descrittiva

Un esempio delle carte prodotte è riportato nella **figura 3.4.14**. Gli scenari delineati sono direttamente collegati al servizio di preannuncio delle piene ed ai livelli di allerta emessi dal Centro Funzionale Regionale e quindi possono essere alla base della realizzazione dei piani di protezione civile. Questi scenari predefiniti sono certamente utili per la programmazione degli interventi, ma è fondamentale che a seguito dell'emissione di un avviso di criticità vengano avviate le attività di presidio territoriale volte ad osservare in sito la reale dinamica dell'evento in corso, attività che va intensificata man mano che la situazione si fa più critica.

Infatti la complessità dei fenomeni in gioco e le perturbazioni generate da fenomeni non prevedibili possono anche impattare sensibilmente sulle inondazioni. Un esempio per tutti è dato dall'interferenza dei ponti con il materiale flottante che per le piene maggiori può determinare la parzializzazione delle sezioni di deflusso ed incrementare significativamente i livelli idrici a monte con il risultato che territori normalmente in sicurezza possono essere interessati dall'inondazione.

Per i corsi d'acqua arginati il presidio diventa ancora più importante per la verifica della tenuta arginale, attività peraltro già prevista dai Regi Decreti n. 523/1904 e n. 2669/1937 in termini di servizio di piena e di pronto intervento idraulico per i tronchi classificati di prima e seconda categoria. Infine è importante ricordare la necessità di una verifica permanente del rischio attuale da parte delle amministrazioni che utilizzano i piani per tener

conto degli inevitabili cambiamenti nel tempo della pericolosità e della vulnerabilità del territorio. Per questo è bene prevedere un programma di periodico aggiornamento degli scenari per tenere conto di eventuali modificazioni del corso d'acqua come possono essere le modificazioni morfologiche, la realizzazione di nuove opere di difesa e nuovi insediamenti.

Bibliografia

Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E. & Rasmussen J. (1987a), *An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen*. "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system, *Journ. of Hydrol.*, pp. 87.

Barclay P.A. & Wilk K.E. (1970), *Severe thunderstorm radar echo motion and related weather events hazardous to aviation operations*. ESSA Tech. Mem, ERLTM-NSSL, pp. 46-63.

Bechini R. & Cremonini R. (2002), *The weather radar system of north-western Italy: an advanced tool for meteorological surveillance*. Proc. of ERAD, pp. 400-404, Copernicus GmbH 2002.

Beven K.J. (1985), *Distributed models*, in *Hydrological forecasting*.

Barbero S., Boni G., Crosta A., Ferraris L. & Rabuffetti D. (2002), *Modelli idrologico-idraulici per la previsione operativa delle piene: valutazioni sugli*

- effetti delle scale della modellazione idrologica. Atti del 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, Italia, vol. 1, pp. 419-428.
- Brooks, R.H. & Corey, T. (1964), *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology Paper No. 3, Colorado State Univ., Ft. Collins, Colorado.
- Brooks, R.H. & Corey T. (1966), *Properties of porous media affecting fluid flow*. J. Irrig. Drainage Div. A.S.C.E. IR2; pp. 61-88.
- Carrara A. (1988), *Drainage and divide networks derived from high fidelity digital terrain models*. In Quantitative analysis of mineral and energy resources, edited by C.F.Chung, NATO-ASI series C, pp. 223.
- Chow V.T., Maidment D.R. & Mays L.W. (1988), *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International.
- Cremonini R., Bechini R., Campana D., Rabuffetti D. & Giudici I. (2004), *An implementation of Kalman filter in north-western Italy for radar calibration using 3-hourly gauges measurements and polarimetric C-band radar estimates*. Proc. of the 3rd European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD), pp. 352-355.
- Dixon M. & Wiener G. (1993), *TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis and nowcasting – a radar based methodology*. J. Atmos. Oceanic Tech., pp. 10, 785-797.
- DHI Water & Environment MIKE 11 (2001-2004), *A modelling system for river channels*. Reference Manual.
- Dunne T. (1978), *Field studies of hillslope processes*. In Hillslope Hydrology edited by Kirby M. J., John Wiley, New York, pp. 227-293.
- Golding B.W. (1998), *Nimrod: A system for generating automated very short range forecasts*. Meteorol. Appl., vol. 5, pp. 1-16.
- Horton R.E. (1933), *The role of infiltration in the hydrologic cycle*. Trans. Am. Geophys. Union, vol. 14, pp. 446-460.
- Hydroptimet (2004), *Final report*. In press.
- Kessler E. (1966), *Computer program for calculating average lengths of weather radar echoes and pattern bandedness*. J. Atmos. Sci., vol. 23, pp. 569-574.
- Mancini M., Montaldo N. & Rosso R. (2000), *Effetti di Laminazione di un sistema di invasi artificiali nel bacino del fiume Toce*. *l'Acqua*, vol. IV.
- Murphy A.H. & Winkler R.L. (1997), *A general framework for forecast verification*. Monthly Weather Review, pp. 115.
- Penman H.L. (1948), *Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass*. Proc. Roy. Soc. London, A193, pp. 120-145.
- Ponce V.M. (1989), *Engineering Hydrology*.
- Priestley C.H.B. & Taylor R.J. (1972), *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters*. Monthly Weather Rev., vol. 100, pp. 81-92.
- Ravazzani, G., Montaldo, N. & Mancini, M. (2002), *Modellistica idrologica distribuita per il caso di studio del bacino del fiume Toce*. Atti del 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, Italia, vol. 1, pp. 341-348.
- Richards L.A. (1931), *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. Physics, I, pp. 318-333.
- Rosso R. (1994), *An introduction to spatial distributed modeling of basin response*. In Advances in Distributed Hydrology, ed. by Rosso R., Peano A., Becchi I. & Bemporad G., Water Resources Publications.
- Santini A., Romano N., Ciollaro G. & Comegna (1995), *Evaluation of laboratory inverse method for determining unsaturated hydraulic properties of a soil under different tillage practices*. Soil Science, vol. 160, pp. 340-351.
- Siccardi F. (1995), *Rainstorm Hazard and Related Disasters in the North-West Mediterranean Region*. Remote Sensing Reviews, vol. 14, pp. 5-21.
- Tarboton D.G. (1997), *A new method for the determination of flow direction and upslope areas in grid digital elevation models*. Water Resources Research, vol. 33, pp. 309-319.
- USDA (1972 e 1986), [U.S. Department of Agriculture] Soil Conservation Service, *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology, Rev. ed., U.S. Department of Agriculture, Washington D.C., U.S.A.
- Van Genuchten M.T. (1980), *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 44, pp. 892-898.
- WMO (2002), *Associated Programme on Flood Management*.