

Un esempio di modellistica integrata per l'analisi dei processi che controllano la frequenza delle piene fluviali

Salvatore Manfreda¹, Mauro Fiorentino¹ e Vito Iacobellis²

¹Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente (DIFA) e Centro Interuniversitario per il Monitoraggio Ambientale (CIMA), Università degli Studi della Basilicata.

²Dipartimento di Ingegneria delle Acque e di Chimica (DIAC), Politecnico di Bari.

E-mail: manfreda@unibas.it

SOMMARIO. Nel 2002, Manfreda *et al.* hanno sviluppato un modello idrologico, denominato D-HsM (Daily and Hourly scale Model), per l'interpretazione dell'evoluzione degli stati di imbibizione del suolo e degli idrogrammi di piena. Esso utilizza due moduli accoppiati: uno alla scala giornaliera, progettato per valutare le condizioni antecedenti gli eventi di piena ed uno alla scala oraria per la simulazione delle stesse. Nella presente memoria, il modello è presentato nella sua versione aggiornata e viene applicato ad un bacino semiarido dell'Italia Meridionale. Il modello ha consentito, mediante simulazione in continuo, la ricostruzione della distribuzione di probabilità delle portate al colmo di piena e lo studio delle componenti che maggiormente condizionano il processo di formazione delle piene. A tale scopo, il modello idrologico D-HsM è stato utilizzato in cascata ad un modello di disaggregazione delle serie giornaliere di precipitazione.

1 INTRODUZIONE

Nel 2002, Manfreda *et al.* hanno proposto l'utilizzo comparativo di modelli idrologici distribuiti e distribuzioni delle piene teoricamente derivate, per indagare sui fattori che controllano la frequenza delle piene.

La simulazione idrologica può svolgersi sia mediante modelli di tipo concentrato sia mediante modelli di tipo distribuito. Questi ultimi presentano il merito di tenere in debita considerazione la variabilità spaziale sia delle grandezze idrologiche sia delle caratteristiche fisiche dei bacini a fronte di elevati costi computazionali. I primi, oltre alla semplicità computazionale, hanno il pregio di rappresentare "sinteticamente" l'effetto dell'integrazione dei processi a scala di bacino. L'uso dei due approcci può consentire una migliore comprensione del controllo che singoli processi, quali formazione dei deflussi superficiali e subsuperficiali, umidità del suolo, evapotraspirazione, ecc., esercitano sulla distribuzione di probabilità delle piene.

Le indagini qui presentate, condotte tramite simulazioni numeriche, sono state orientate a valutare la attendibilità di alcune ipotesi alla base di modelli teorici per la derivazione della distribuzione di probabilità delle portate al colmo di piena, quali quello

proposto da Iacobellis e Fiorentino (2000). In tale contesto, è opportuno sottolineare che, almeno in linea di principio, lo scopo dell'intera linea di ricerca è essenzialmente speculativo piuttosto che operativo. In questo spirito, alcune componenti del modello teorico, quali le distribuzioni di probabilità marginali delle precipitazioni e delle aree contribuenti, così come pure le loro relazioni reciproche, erano state definite sulla base di conoscenze più o meno consolidate circa i fenomeni idrologici che sottendono alla formazione delle piene, ma richiedevano comunque una successiva validazione sperimentale. Tuttavia, i risultati incoraggianti ottenuti dal modello probabilistico e la loro relativa consistenza riguardo ad alcuni ben identificati controlli esercitati dal clima e dalle caratteristiche del terreno sulla distribuzione di probabilità delle piene (Fiorentino *et al.*, 2003) stimolano la ricerca verso maggiori approfondimenti sui processi di formazione delle piene per aumentarne il relativo potenziale speculativo.

D'altra parte, in senso più generale, la ricerca della "firma" idrologica della distribuzione di probabilità delle piene non è semplice. Infatti, essendo il comportamento complessivo di un bacino il risultato della integrazione di processi agenti ad una vasta gamma di scale, sembra assolutamente arduo, ad e-

sempio, studiare la fisica della generazione delle piene tramite indagini di laboratorio ed anche difficile estrarne informazioni utili nel dominio delle frequenze. Di conseguenza, la strada per risolvere il problema è probabilmente rappresentata dall'uso di laboratori virtuali basati su modelli numerici o matematici adatti a riprodurre le caratteristiche principali dei processi fisici alla base dei meccanismi della generazione delle piene, comprese le dinamiche di imbibizione dei suoli, l'intermittenza ed il carattere stagionale delle precipitazioni, la propagazione dell'onda di piena, ecc.

D'altra parte, anche se la modellistica idrologica per la simulazione delle portate superficiali e subsuperficiali costituisce uno strumento di grande utilità per i problemi di gestione della risorsa idrica, e sebbene numerosi modelli siano stati proposti negli ultimi decenni, è evidente che questi sono stati pensati essenzialmente per scopi operativi, così privilegiando l'ottimizzazione piuttosto che la consistenza fisica. Tra questi, il TOPMODEL (Beven e Kirkby, 1979; Beven *et al.*, 1984; Sivapalan *et al.*, 1987) è certamente degno di menzione.

La simulazione idrologica in continuo è stata anche utilizzata per la derivazione delle distribuzioni di probabilità delle portate al colmo di piena (Cameron *et al.*, 1999 e 2000; Blazkova e Beven, 2002). Tale approccio consente di portare in debita considerazione l'eterogeneità spaziale delle caratteristiche geomorfologiche dei bacini, tessiturali dei suoli e della vegetazione, e permette di estendere lo studio delle piene a periodi di ritorno alti prescindendo dall'estrapolazione di relazioni tarate con riferimento a brevi periodi di osservazione diretta. Negli studi sopra citati però la scarsa affidabilità dei modelli ha prodotto inevitabilmente elevate incertezze nella definizione finale delle portate al colmo di piena.

In questo lavoro, le caratteristiche delle distribuzioni di probabilità delle piene e di alcuni dei principali fenomeni che le influenzano sono analizzate mediante l'uso di un modello per la simulazione delle portate giornaliere e orarie, qui denominato D-HsM, proposto in una versione precedente da Manfreda *et al.* (2002). Nella presente memoria viene presentato come caso di studio quello del bacino del Bradano, a clima secco, in rapporto alle analisi presentate da Manfreda *et al.* (2002) svolte sul bacino dell'Agri, a clima umido.

Il modello D-HsM è stato implementato in uno schema di simulazione in continuo per la ricostruzione delle portate al colmo di piena. Lo schema di calcolo prevede l'utilizzo del modello IRP (Veneziano e Iacobellis, 2002) per la disaggregazione di serie osservate di precipitazioni giornaliere.

2 AREA DI STUDIO

La regione Basilicata è stata per lungo tempo considerata un laboratorio naturale di idrologia sia perché il suo territorio è scarsamente antropizzato sia per le forti differenze climatiche e fisiche presenti al suo interno. Tuttavia, essa rappresenta una area di alto interesse scientifico nell'ambito delle attività di studio dell'interazione clima-suolo-vegetazione.

Il Bradano è il più settentrionale dei cinque fiumi del versante ionico lucano; è lungo circa 120 Km ed attraversa entrambe le province della regione. Ha una estensione di oltre 2700 Km², di cui circa 2000 ricadono in territorio lucano, mentre la restante parte appartiene alla Puglia. Al suo interno è ubicata la diga di San Giuliano che con i suoi 105 Mm³ di capacità risulta essere uno dei più importanti invasi dell'Italia meridionale.

A causa della presenza di detto invaso si è lavorato su di un'area posta a monte che non risentisse della sua influenza. Per tale motivo si è scelta la sezione del Bradano a ponte Colonna (Figura 1) come chiusura del bacino oggetto di studio, il quale ricade in un'area a clima tipicamente secco-subumido, contrariamente al caso dell'Agri che è a clima umido. Il bacino studiato ha una area di circa 462 km² e riceve afflussi medi annuali dell'ordine dei 680 mm. L'uso del suolo è caratterizzato da una predominanza di colture arboree e cerealicole che coprono più del 77% dell'area totale, mentre la restante parte è coperta da boschi e terreni semi-naturali. Dal punto di vista geologico, la parte più orientale del bacino presenta una netta prevalenza di argille grigio azzurre ed argilloscisti varicolori che insieme rappresentano quasi il 58% dell'area totale, mentre nella parte occidentale si ha la presenza più o meno omogenea di altre formazioni litologiche quali: alluvioni, detriti, flysch numidico e sabbie e conglomerati.

Le caratteristiche tessiturali del bacino e quindi i parametri pedologici utilizzati nel modello sono assegnati sulla base di uno studio regionale orientato a definire la pedologia dei suoli (Carriero, 2003).

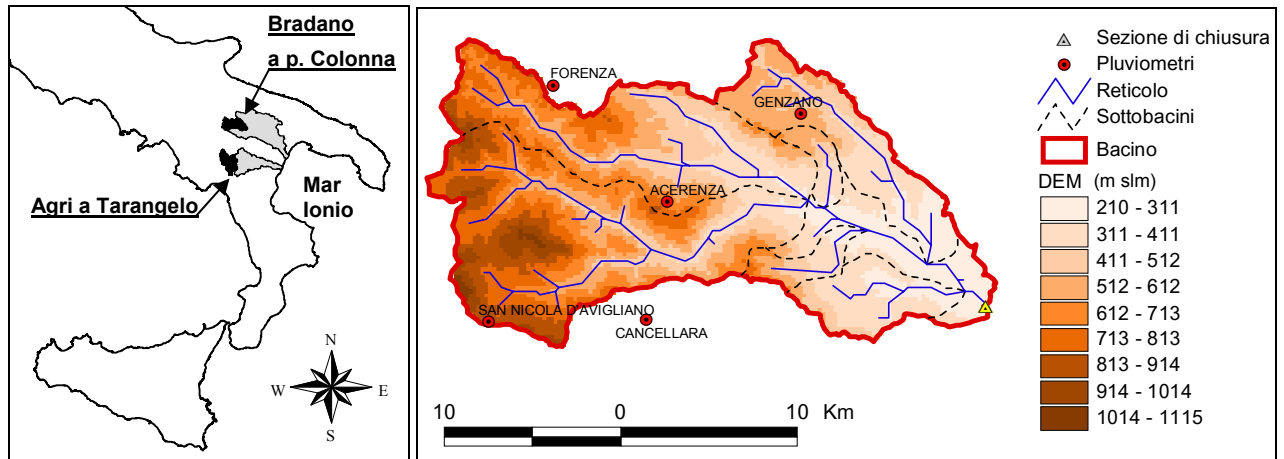


Figura 1. Descrizione del bacino del fiume Bradano chiuso alla sezione di ponte Colonna: DEM (240 m), reticolo idrografico calcolato e stazioni pluviometriche.

3 LA DISAGGREGAZIONE DELLE PIOGGE GIORNALIERE E LA SIMULAZIONE IDROLOGICA

La disponibilità di dati pluviometrici ad alta risoluzione temporale è spesso scarsa e comunque relativa a periodi di registrazione brevi. Questo è particolarmente vero per il territorio lucano, in cui le registrazioni idrologiche hanno subito numerose interruzioni negli anni e dove la disponibilità di dati a scansione sub-oraria è limitata ai soli ultimi 8-12 anni. Per tale motivo si è scelto di sviluppare una procedura di disaggregazione sfruttando la relativa abbondanza di registrazioni a base giornaliera.

La procedura utilizzata per svolgere la disaggregazione temporale delle serie di pioggia giornaliera è basata sul modello Iterated Random Pulse (IRP) proposto da Veneziano *et al.* (2002) e utilizzato da Veneziano and Iacobellis (2002) per la disaggregazione a livello sub-orario di una serie temporale di impulsi che costituiscono il cosiddetto “processo esterno”, caratterizzante l’occorrenza degli eventi e le loro caratteristiche principali in termini di intensità media.

Nella procedura di disaggregazione qui utilizzata la struttura del processo esterno è sostituita dalle piogge giornaliera osservate. In particolare il modello IRP è stato utilizzato per descrivere le dinamiche della precipitazione alle scale sub-giornaliere utilizzando le serie storiche giornaliera come primo livello nella sequenza di sovrapposizione di impulsi gerarchici nidificati che costituisce il processo IRP.

Nella procedura, ogni giorno di pioggia è stato considerato come evento indipendente al fine di preservare l’informazione di partenza rappresentata dalle stesse piogge giornaliera. Una rappresentazio-

ne schematica dei risultati ottenibili mediante tale procedura è mostrata in Figura 2, dove vengono riportate una finestra della serie delle precipitazioni giornaliera (40 giorni) e una sua disaggregazione a base oraria.

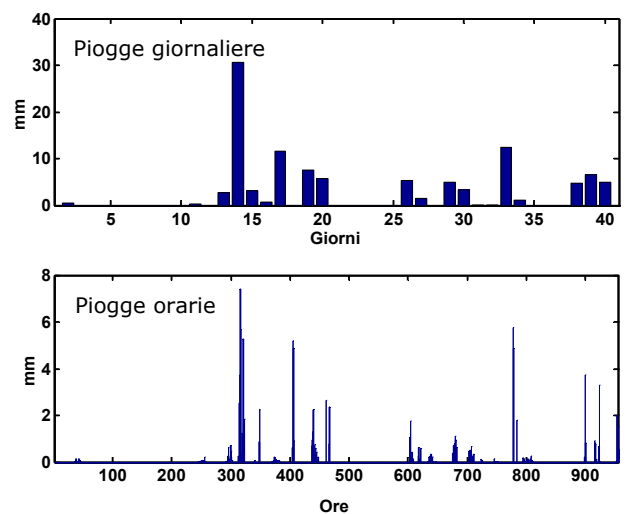


Figura 2. Processo di disaggregazione delle precipitazioni giornaliera su di una finestra temporale di 40 giorni.

La stazione di riferimento utilizzata per le misure di pioggia giornaliera è quella di Acerenza. Quest’ultima è ritenuta rappresentativa dell’area di studio sia per la sua posizione all’interno del bacino (vedi Figura 1) sia perché presenta precipitazioni medie annuali (circa 650 mm) molto prossime all’afflusso medio del bacino. Per tale stazione, inoltre, sono disponibili circa 30 anni di registrazioni giornaliera continue e di corrispondenti massimi annuali delle piogge orarie (dal 1951 al 1980).

Le serie ottenute mediante la disaggregazione sono validate per confronto con le distribuzioni dei

massimi annuali delle piogge registrate alle durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore. Il confronto è svolto tracciando le curve di possibilità climatica delle serie disaggregate relative a 25 sequenze di piogge orarie generate dal modello IRP (Figura 3), a partire dalla serie osservata di pioggia giornaliera.

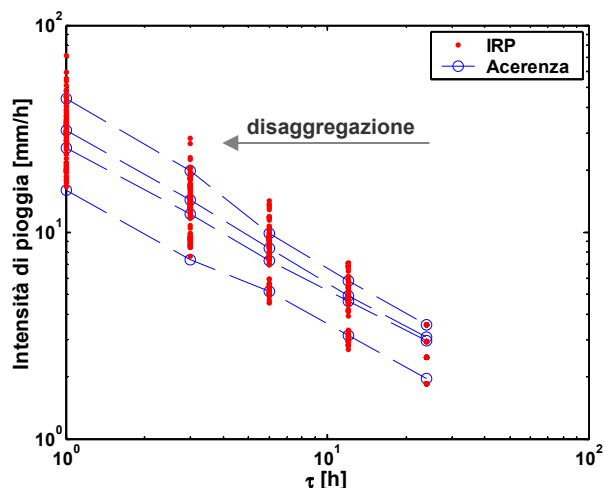


Figura 3. Confronto tra le curve di possibilità climatica delle serie di pioggia ottenute mediante disaggregazione (25 sequenze) e dei massimi annuali di pioggia osservati alla stazione di Acerenza.

Nella simulazione idrologica, le piogge orarie sono state utilizzate come forzante del modello per il calcolo delle piene (HsM). È necessario precisare, a tal proposito, che le precipitazioni sono state assunte uniformi nello spazio. Per ovviare alle inevitabili sovrastime legate a questa ipotesi le piogge sono state ridotte mediante il coefficiente di riduzione areale proposto dall'U.S. Weather Bureau.

3.1 LA SIMULAZIONE IDROLOGICA

Il modello idrologico sviluppato è il D-HsM, acronimo di "Daily-Hourly scale Model". Tale modello svolge la simulazione idrologica in continuo passando dalla scala giornaliera (DsM) a quella oraria (HsM) quando il sistema individua un evento di particolare intensità. Questo artificio consente una notevole riduzione dei tempi di elaborazione ed allo stesso tempo una buona rappresentazione del processo, in quanto le dinamiche di imbibizione del suolo sono comunque ben interpretate alla scala giornaliera (Rodríguez-Iturbe *et al.*, 2001; Laio *et al.*, 2001).

Manfreda *et al.* (2002) presentarono un modello idrologico analogo a quello qui utilizzato. La versione attuale ne rappresenta un suo aggiornamento in cui alcune equazioni sono state modificate. In particolare, il processo di generazione del ruscella-

mento superficiale è stato modificato privilegiando la sola componente legata all'eccesso di saturazione e sono state incluse le perdite dovute all'intercezione della vegetazione secondo quanto proposto da Famiglietti e Wood (1994). Il modello ha tre parametri di calibrazione, due per il modulo giornaliero ed uno per quello orario, che saranno discussi nel seguito.

Elemento caratterizzante del modello, specie nella versione qui presentata, è il modo in cui viene trattato il deflusso subsuperficiale. Quest'ultimo è generato per exfiltrazione dalle celle che arrivano a saturazione mediante il meccanismo di redistribuzione. Questo è governato da una funzione di redistribuzione applicata ad ogni sottobacino rappresentato in Figura 1. Il processo si innesca solo al superamento della capacità di campo ed è regolato dalla seguente espressione:

$$RS_{t,j} = \left(\frac{W_j \sum_{i=1}^N \max[c(S_{t,i} - S_{c,i})]}{\sum_{i=1}^N W_i} \right) - \max[c(S_{t,j} - S_{c,j})] \quad (1)$$

dove: $RS_{t,j}$ è il flusso subsuperficiale relativo alla cella j , W_i è l'indice topografico, introdotto da *Bever e Kirkby* (1979), calcolato per l' i -esima cella, $S_{t,i}$ è il contenuto d'acqua del suolo relativo alla cella i al tempo t (Figura 4), $S_{c,i}$ è il contenuto d'acqua alla capacità di campo relativo alla cella i , N è il numero di celle del sottobacino in cui ricade la cella j -esima e c [T^{-1}] è il parametro di redistribuzione. Quest'ultimo rappresenta un parametro di calibrazione del modello.

In Figura 4 è riportata la schematizzazione del suolo, secondo il modello D-HsM, con le principali componenti che concorrono al bilancio idrico. Il contenuto d'acqua è controllato dalla seguente equazione applicata alla scala di cella, in cui per semplicità si trascura la notazione del pedice j :

$$S_{t+\Delta t} = S_t + I_t - E_t - RS_t - R^{(fp)}_t \quad (2)$$

dove $S_{t+\Delta t}$ rappresenta il contenuto di acqua nel suolo al tempo $t+\Delta t$, I_t l'infiltrazione nel suolo durante il tempo Δt , E_t l'evapotraspirazione reale, RS_t il flusso subsuperficiale, $R^{(fp)}_t$ la ricarica della falda profonda.

La calibrazione del modello avviene in modo distinto con riferimento ai due moduli: giornaliero ed orario. Nel primo caso simulando i soli deflussi giornalieri mediante l'utilizzo di piogge giornalieri registrate alle differenti stazioni di misura del bacino (Figura 1). Nel secondo caso, invece, utilizzando il modello DsM per definire le condizioni antece-

menti un evento di piena e HsM per simulare un evento registrato.

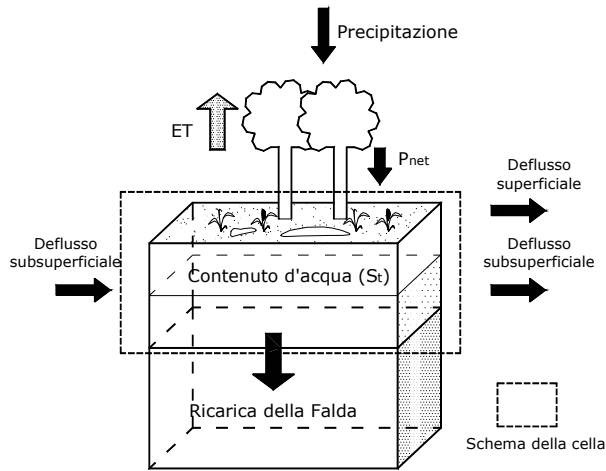


Figura 4. Schematizzazione del bilancio al suolo.

Il modello giornaliero ha fondamentalmente due parametri di calibrazione: la costante di recessione del deflusso di base e la costante di redistribuzione del deflusso sub-superficiale c . La prima può essere stimata direttamente dalle curve di esaurimento degli idrogrammi registrati, mentre la seconda è stata tarata minimizzando l'errore quadratico medio (RMSE) ottenuto confrontando gli idrogrammi registrati con quelli simulati su una finestra temporale di due anni. Le analisi svolte hanno portato ad assegnare un valore di $c=0.25$ (giorni⁻¹), mentre la costante di esaurimento del deflusso profondo risulta pari a 45 giorni.

Il modello giornaliero (DsM) è stato validato mediante simulazione su una finestra temporale di 7 anni (1955-1961). I risultati della simulazione sono riportati in Figura 5. Le serie storiche delle portate giornaliera si riferiscono a periodi precedenti gli anni ottanta, infatti dopo tale periodo l'ufficio idrogra-

fico non ha prodotto ulteriori pubblicazioni di dati. Gli idrogrammi simulati sono messi a confronto sia con la serie cronologiche delle portate registrate (Figura 5A) sia con la curve di durata (Figura 5B). Il confronto visivo tra le serie consente una valutazione positiva sulle prestazioni del modello DsM. Inoltre, al fine di quantificare l'efficienza delle simulazioni, sono stati utilizzati alcuni indici comunemente utilizzati per la stima degli errori e dell'efficienza delle simulazioni idrologiche quali: RMSE errore quadratico medio, AAE errore assoluto medio, CR1 efficienza nella riproduzione dei valori bassi di portata (deflusso di base) e CR2 efficienza nella riproduzione del bilancio idrologico. CR1 e CR2 valgono rispettivamente

$$CR1 = 100 \frac{\left(\sum_{i=1}^n (\log(Q_{ci} + r) - \log(Q_{oi} + r))^2 \right)}{\left(\sum_{i=1}^n (\log(Q_{oi} + r) - \log(\bar{Q}_o + r))^2 \right)} \quad (3)$$

$$CR2 = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_{oi}}{\sum_{i=1}^n Q_{ci}} - 1 \right) \quad (4)$$

dove: Q_{oi} è l' i -esima ordinata della portata osservata, Q_{ci} è l' i -esima ordinata della portata simulata, \bar{Q}_o è la media delle portate osservate, r è un numero positivo che è stato posto pari ad 1 ed n è il numero di registrazioni.

Le analisi mostrano che il modello DsM fornisce risultati soddisfacenti e costituisce uno strumento affidabile per la ricostruzione delle portate giornaliere e per l'interpretazione dello stato del sistema ovvero l'imbibizione dei suoli.

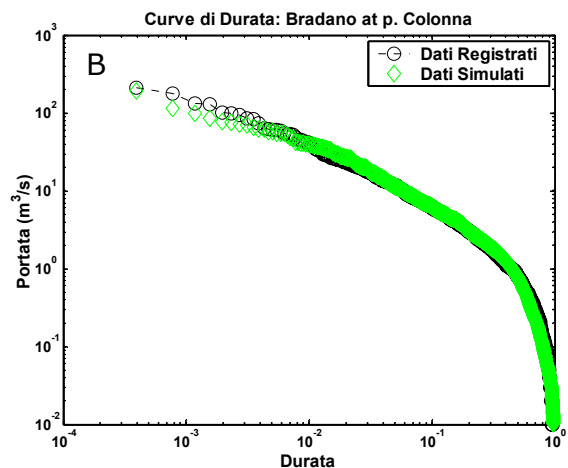
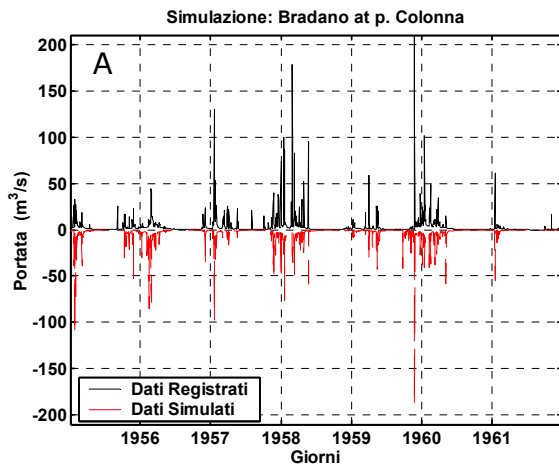


Figura 5. Risultati delle simulazioni a scala giornaliera, ottenute mediante DsM per il Bradano a ponte Colonna (RMSE=7.7, AAE=1.9, CR1=79.5%, CR2=98.9%).

Il modello a scala oraria include un parametro di calibrazione, il raggio idraulico alla sezione di chiusura (Manfreda *et al.*, 2002), che può essere ottenuto facendo riferimento ad eventi di piena registrati.

I risultati fin ora descritti supportano le procedure di calibrazione e validazione del modello D-HsM alle differenti scale temporali alle quali esso opera. Tali verifiche consentono di affrontare lo studio delle distribuzioni di probabilità delle piene nella consapevolezza di avere sviluppato un modello in grado di riprodurre i fenomeni fisici a scala di bacino in modo attendibile. Tutto questo costituisce una base di partenza per poter utilizzare lo schema di calcolo per indagare sulla frequenza delle piene fluviali.

Utilizzando lo schema di simulazione riportato in Figura 6, il modello D-HsM è stato utilizzato per ricostruire la distribuzione di probabilità delle portate al colmo di piena alla sezione del Bradano a ponte Colonna. Il modello utilizza i dati giornalieri, nel momento in cui viene individuata una precipitazione superiore ad una assegnata soglia s , che in questo caso è stata fissata al valore di 30 mm/giorno, la simulazione passa dalla scala giornaliera a quella oraria per ricostruire l'idrogramma di piena. In particolare, la simulazione di ogni evento di piena si svolge facendo ricorso alla disaggregazione descritta nel paragrafo precedente.

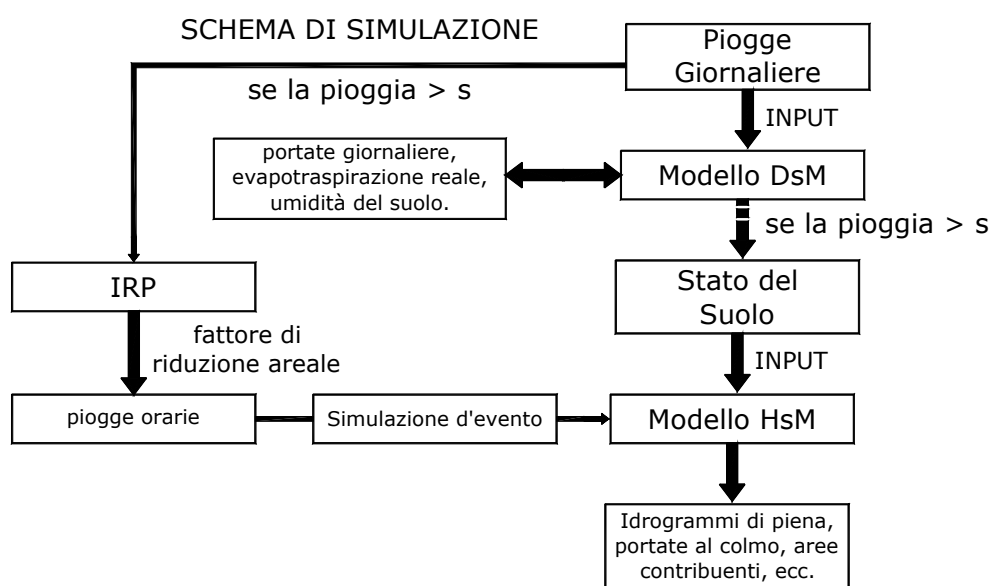


Figura 6. Schema adottato per svolgere la simulazione in continuo.

La procedura così sviluppata consente di ricostruire una notevole mole di informazioni quali: idrogrammi di piena, mappe di umidità del suolo, portate ed aree contribuenti al colmo di piena. In particolare, le serie dei massimi annuali delle portate al colmo di piena generate attraverso 25 sequenze diverse di disaggregazione (ognuna pari a 30 anni di simulazione) sono messe a confronto con le serie registrate alla stazione del Bradano a Ponte Colonna (anni di osservazione dal 1921 al 1970) in Figura 7. Qui si può notare come la casualità introdotta attraverso la procedura di disaggregazione adottata si riflette sulla distribuzione di probabilità delle piene registrata presso detta stazione.

Le simulazioni idrologiche sono state eseguite nell'ottica di approfondire le conoscenze sulle dinamiche dominanti nella generazione delle piene. In particolare, si è guardato al problema della genera-

zione delle portate al colmo di piena e delle relative aree contribuenti.

Gli eventi generati sono stati analizzati al fine di valutare la funzione densità di probabilità (f_{dp}) delle aree contribuenti al colmo di piena che riveste interesse rilevante nella derivazione teorica delle distribuzioni di probabilità delle piene (vedi Iacobellis e Fiorentino, 2000).

Le f_{dp} ottenute mediante le differenti sequenze di disaggregazione mostrano una dispersione campionaria dei valori che è contenuta attorno alla f_{dp} media rappresentata in Figura 8. La f_{dp} ottenuta aggregando tutte le simulazioni è messa a confronto con la distribuzione teorica gamma definita sulla base dei parametri riportati in Fiorentino e Iacobellis (2001). Va quindi sottolineato che la distribuzione riportata con tratto continuo non è adatta ai valori mostrati in figura che provengono dalla simulazio-

ne, ma è definita mediante i parametri stimati con il modello teorico sopra citato. Il grafico mostra un buon adattamento tra la distribuzione teorica ed il dato simulato pur mostrando un comportamento leggermente diverso in corrispondenza della coda destra. L'analisi delle Figure 7-8 suggerisce che l'effetto della casualità della disaggregazione, pur portando ad una limitata incertezza nella stima delle curve di possibilità climatica (vedi Figura 3) induce

una dispersione dei valori delle aree contribuenti che si riflette moderatamente sulla distribuzione di probabilità delle piene. Ciò consente anche di affermare che, noto il suo valore atteso, l'incertezza sulla struttura e sulla varianza della distribuzione delle aree contribuenti possono influire in modo contenuto sulla forma dalla distribuzione di probabilità delle piene.

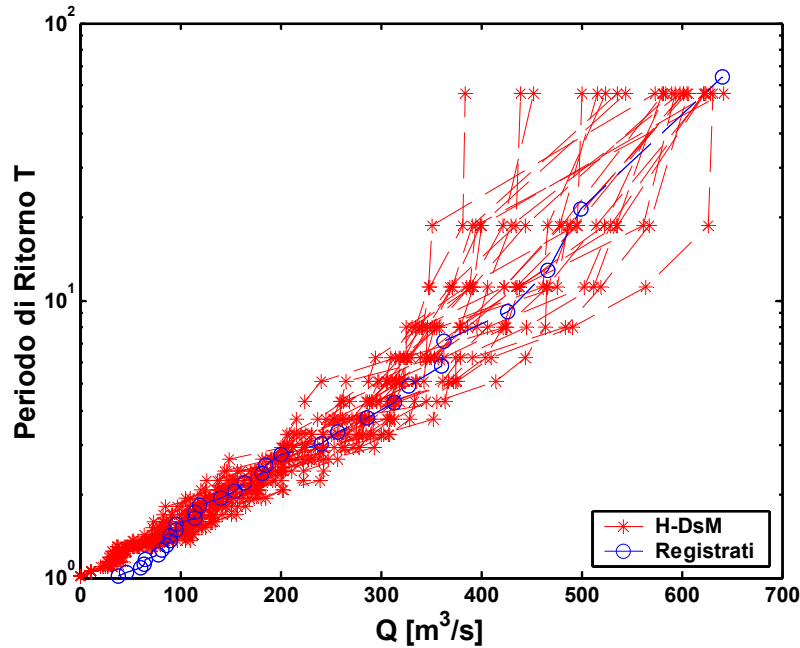


Figura 7. Distribuzioni di probabilità delle portate al colmo di piena registrate e simulate.

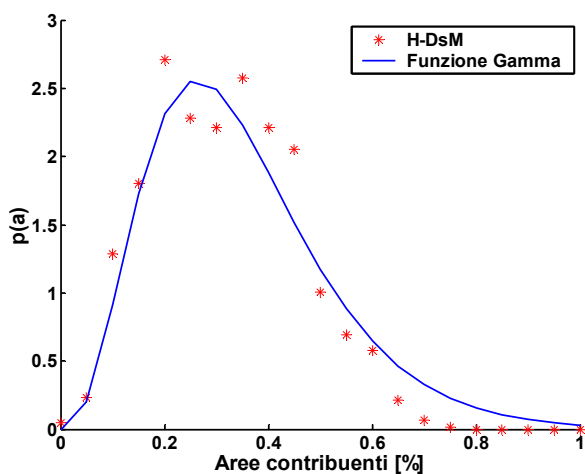


Figura 8. *fdp* media delle aree contribuenti al colmo di piena del Bradano a ponte Colonna ottenute in 25 sequenze di disaggregazione di 30 anni di piogge giornaliere.

4 CONCLUSIONI

I modelli idrologici costituiscono uno strumento adatto allo studio delle caratteristiche delle distribuzioni di probabilità delle piene. Attualmente, tuttavia, il loro uso è fondamentalmente di tipo speculativo piuttosto che operativo e devono obbedire a principi di consistenza piuttosto che d'ottimizzazione. Le analisi presentate all'interno di questa memoria supportano il modello probabilistico di derivazione proposto da Iacobellis e Fiorentino (2000) ed in particolare rivelano un buon accordo fra i risultati ottenuti dall'approccio teorico e quelli basati sulla simulazione idrologica in continuo.

Le indagini svolte all'interno del presente lavoro trovano giustificazione e conforto nelle verifiche effettuate sulla base dei dati disponibili. Esse, inoltre, supportano l'idea che i laboratori idrologici virtuali, pur non potendo rappresentare a pieno la complessa realtà fenomenologica, consentono di interpretarne le caratteristiche più significative.

La metodologia presentata può risultare utile nello studio e nell'approfondimento di altre peculiarità delle distribuzioni di probabilità delle piene quali il comportamento dalla coda destra in funzione del contesto geo-morfo-climatico e della presenza di soglie di generazione del deflusso superficiale.

Ringraziamenti: Il presente lavoro è stato realizzato nell'ambito del PRIN CoFin2003 (2003084552) "Sperimentazione idrologica a scala di bacino per la valutazione d'impatto delle dinamiche clima-suolo-vegetazione sui processi idrologici di base ed estremi" e grazie ai fondi del progetto PON "Sviluppo dei Distretti Industriali di Osservazione della Terra COS(OT)".

BIBLIOGRAFIA

- K.J. Beven e M.J. Kirkby, A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1), pp 43-69, 1979.
- K.J. Beven, M.J. Kirkby, N. Schofield e A.F. Tagg, Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U.K. catchments. *J. Hydrol.*, 69, 119-143, 1984.
- S. Blazkova e K.J. Beven, Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment treated as ungauged (with uncertainty). *Water Resour. Res.*, (38)8, pp (14-1)-(14-14), 2002.
- D.S. Cameron, K.J. Beven, J. Twan e P. Naden, Flood estimation by continuous simulation (with likelihood based on uncertainty estimation), *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 4(1), 23-34, 2000.
- D.S. Cameron, K.J. Beven, J. Twan, S. Blazkova e P. Naden, Flood frequency estimation by continuous simulation for a gauged upland catchment (with uncertainty). *J. Hydrol.*, 219, 169-87, 1999.
- D. Carriero, Analisi della distribuzione delle caratteristiche idrologiche dei suoli per applicazioni di modelli afflussi-deflussi, Tesi di dottorato, relatori M. Fiorentino e N. Romano, Potenza, 2004.
- J.S. Famiglietti e E.F. Wood, Multi-Scale Modeling of Spatially-Variable Water and Energy Balance Processes, *Water Resour. Res.*, 30(11), pp 3061-3078, 1994.
- M. Fiorentino e V. Iacobellis, New insights about the climatic and geologic control on the probability distribution of floods, *Water Resour. Res.*, 37(3), pp 721-730, 2001.
- M. Fiorentino, D. Carriero, G. Laguardia, S. Manfreda, M.R. Margiotta, R. Rosano, A. Sole, V. Iacobellis, Una proposta metodologica per la mappatura della variabilità spaziale delle perdite idrologiche durante i fenomeni di piena, "Convegno Nazionale sulla Conservazione dell'ambiente e rischio idrogeologico", Assisi, pubb. CNR-GNDCI n. 2830, pp. 147-154, 2003.
- V. Iacobellis e M. Fiorentino, Derived distribution of floods based on the concept of partial area coverage with a climatic appeal, *Water Resour. Res.*, 36(2), pp 469-482, 2000.
- F. Laio, A. Porporato, L. Ridolfi e I. Rodríguez-Iturbe, Plants in water controlled ecosystems: Active role in hydrological processes and response to water stress, II. Probabilistic soil moisture dynamics, *Advances in Water Res.* (24), pp. 707-723, 2001.
- S. Manfreda, V. Iacobellis e M. Fiorentino, Un'analisi della variabilità delle aree contribuenti al deflusso di piena mediante modello idrologico distribuito, 28° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, Vol.1, pp. 360-372, 2002.
- I. Rodríguez-Iturbe, A. Porporato, L. Ridolfi, V. Isham e D.R. Cox, Probabilistic Modeling of Water Balance at a point: The Role of Climate, Soil and Vegetation, *Proceedings Royal Society Series A*, 455, pp. 3789-3805, 1999.
- M. Sivapalan, K.J. Beven e E.F. Wood, On hydrological similarity 2. A scaled model of storm runoff production. *Water Resour. Res.*, 23, 2266-2278, 1987.
- D. Veneziano, P. Furcolo e V. Iacobellis, Multifractality of iterated pulse processes with pulse amplitudes generated by a random cascade, *Fractals*, Vol. 10, No. 2, p. 209-222, 2002.
- D. Veneziano e V. Iacobellis, Multi-scaling pulse representation of temporal rainfall, *Water Resour. Res.*, (38)8, pp (13-1)-(13-13), 2002.