



Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

MODELLI GEOMORFOLOGICI - MONTE CARLO PER LA GESTIONE DEGLI INVASI ARTIFICIALI: FIUME BRENTA CHIUSO A BASSANO

GEOMORFOLOGIC - MONTE CARLO MODEL FOR THE MANAGEMENT OF HYDROPOWER OPERATIONS: BRENTA RIVER IN BASSANO

Michele Ferri¹, Antonio Rusconi¹ e Francesco Baruffi¹

SOMMARIO

La nota descrive lo sviluppo e l'applicazione di un modello innovativo della risposta idrologica per la valutazione dell'efficacia di opere di difesa dalle piene e dell'effettiva azione di laminazione esercitata da invasi artificiali, presenti nel bacino idrografico, in diverse ipotesi di regolazione. Il modello è basato sulla teoria geomorfologica della risposta idrologica, su una accurata descrizione morfologica di reti e versanti mutuata da letture automatiche di mappe digitali del terreno, e fa uso di informazioni telerilevate e distribuite sul territorio per ricavare le informazioni sull'uso del suolo necessarie alla modellazione puntuale dei fenomeni di produzione di deflusso. Il modello è accoppiato ad un modello stocastico delle precipitazioni nello spazio-tempo per la generazione di eventi di precipitazione i cui caratteri sono mutuati dalle statistiche degli eventi massimi annuali registrati sul bacino e ne è previsto anche l'utilizzo con un modello di previsione delle piogge.

La dimostrata aderenza dello schema di calcolo ai processi idrologici dominanti lo qualifica dunque come uno strumento adatto alla previsione delle piene corrispondenti a precipitazioni qualsiasi, reali o sintetiche, ed alla valutazione di come diverse gestioni degli invasi artificiali presenti, simulando differenti manovre e quanto a possibili e ragionevoli svassi preventivi, possano incidere sugli idrogrammi di piena che si determinano nella sezione di chiusura del bacino idrografico. L'interesse del pertinente Piano di Bacino, ai fini della verifica di qualsiasi opera di difesa valliva, appare dunque evidente. Infine la previsione in tempo reale delle precipitazioni a terra accoppiata al modello idrologico consentirà inoltre la determinazione delle portate di piena almeno con un giorno di anticipo fornendo così un supporto fondamentale per i processi decisionali legati alle attività della protezione civile.

Parole chiave: modello della risposta idrologica, previsione delle piene, manovre degli scarichi

ABSTRACT

This paper deals with excerpts of significant results obtained through the application of an accurate and robust mathematical model of the hydrologic response to evaluate the efficiency

¹ Autorità di Bacino dell'Alto Adriatico, Venezia (Tel.: +39-041-714444; Fax: +39-041714313; email: ferrimik@katamail.com)

of hydraulic works regarding the hydrologic defense and hydropower operations. The model, of the geomorphologic – MonteCarlo type, reproduces stochastic and real hydrographs and thereby the return period of peak flows and of any other feature of engineering interest, including shapes and volumes. The salient geomorphic features of the basin is recovered by digital elevation model while the land cover analysis is based on data from remote sensing. We address return periods of floods under different land-use scenarios, provide a framework for the possible, maximally effective protection obtainable from gate operations. The results of the coupling of such geomorphological model with a suitable prediction meteorological model are shown: the implication in risk management and prevention are evident.

Key words: hydrologic response, flood forecasting, gate operations

INTRODUZIONE

Ad un moderno modello di piena si richiede di simulare gli eventi di piena con una affidabilità tale da consentire l'adozione di eventuali misure di sicurezza ed allarme con prestazioni che devono essere valutate su singoli eventi e non attraverso l'analisi statistica delle portate simulate per una serie di piene. Inoltre oggi giorno la verifica di un qualsiasi intervento strutturale di difesa non può prescindere da valutazioni circa il corretto dimensionamento dell'opera medesima non solo nei riguardi della sua funzionalità idraulica ma anche del suo inserimento nel territorio: esigenze di carattere ambientale ed una ridotta disponibilità di grandi volumi in territori a crescente antropizzazione, inducono la necessità di contemperare opere che nella loro efficacia presentino una sempre minore dimensione. E' pertanto richiesto che il procedimento adottato colga il più possibile la dinamica dei processi coinvolti, in modo che uno stesso schema possa riprodurre eventi relativi a diverse stagioni, dati del suolo ed evoluzioni spazio-temporali delle precipitazioni.

Il cumulo delle semplificazioni di solito adottate nella pratica tende dunque rapidamente a divenire eccessivo nel rapporto fra lo stato delle conoscenze e le esigenze del mondo reale. Da una parte, ad esempio, la deduzione del tempo di ritorno di portate di piena dalla storia idrologica di portate osservate nel bacino si basa su una improbabile stazionarietà statistica – non esiste bacino idrografico di una certa importanza in Italia che possa dirsi immune da significative modifiche dell'uso del suolo. Su questa base sola, ad esempio, è questionabile l'uso di metodologie statistiche di regionalizzazione. Dall'altra modelli di trasformazione delle precipitazioni in portate si basano, in genere, su ipotesi da sistemarsi alla luce delle nuove conoscenze. La stagione tecnologica aperta dall'informazione basata sulla descrizione remota dell'uso del suolo, delle distribuzioni spazio-temporali delle precipitazioni e della morfologia del bacino rende obsoleti schemi consolidati: culturalmente, come è naturale; ma anche per ragioni pratiche, potendosi intravedere un notevole margine di utilità delle nuove culture intorno alla definizione del vero tempo di ritorno di eventi di piena, fondata sulla reale geometria del sistema e su assunzioni robuste quali la stazionarietà del clima su scale temporali proporzionali alla vita di opere di difesa. Non pare inopportuno ricordare che schemi geomorfologici della risposta idrologica (Rodriguez-Iturbe & Valdes, 1979) hanno sistemato culturalmente vecchie questioni sopra il presunto primato di metodi a fondamento cinematico o di invaso, ovvero di modelli concentrati piuttosto che distribuiti: potendosi riguardare i metodi razionale e dell'invaso come casi particolari dello schema generale nel quale si possono considerare analiticamente sia effetti di invaso che di propagazione (Rinaldo et al. 1991); inoltre i caratteri del metodo sono distribuiti nella descrizione della morfologia del bacino (Mesa & Mifflin, 1988) ma sono basati sulla formulazione del trasporto per tempi di residenza, e dunque stocastici e concentrati nei loro parametri dinamici (Cox & Miller,

1965; Dagan, 1989). Da queste premesse, la nota descrive brevemente i caratteri degli schemi adottati, in uno con la descrizione dei risultati salienti della loro applicazione al bacino del F. Brenta chiuso a Bassano.

IL MODELLO MATEMATICO

Il bacino montano del Brenta chiuso a Bassano del Grappa ha una superficie di 1567 km² ed è composto in maggioranza di dolomie e calcari. Per le sue differenti caratteristiche idrologiche, il bacino può essere suddiviso in tre parti. Dalle origini alla confluenza con il Cismon (673 km²), suo principale affluente, il fiume scorre in un letto fortemente alluvionale dove si verificano frequenti fenomeni di dispersione e riaffioramento delle acque. Una seconda parte, il bacino imbrifero del Cismon (642 km²), è situata in un'area di abbondanti precipitazioni. Su tale bacino sono operanti serbatoi artificiali per lo sfruttamento idroelettrico ed irriguo della risorsa idrica dei quali il più importante è quello del Corlo, ubicato presso la sezione di chiusura del sotto-bacino. A valle della confluenza con il Cismon sino a Bassano il bacino è caratterizzato dall'apporto di acque carsiche delle quali il contributo più notevole viene dato dall'Oliero. Per la predisposizione del modello sono stati utilizzati i dati idrologici messi a disposizione dall'Ufficio Idrografico e Mareografico della Provincia Autonoma di Trento e del Magistrato alle Acque di Venezia. In particolare, per la pluviometria, sono state utilizzate le registrazioni orarie delle precipitazioni misurate nelle 17 stazioni pluviografiche disponibili in prossimità del bacino. L'ingresso dei dati pluviometrici al modello avviene con una interpolazione geostatistica della funzione aleatoria che descrive i campi spazio-temporali di precipitazione. Per quanto concerne le misure di portata, si è potuto disporre di diverse, eccellenti registrazioni continue di altezza idrometrica, corredate dalle opportune scale delle portate, fornite dall'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia per la sezione di chiusura (Barzizza, ca. Bassano del Grappa); nonché di una mole di dati idraulici ed idrologici rilevanti dai serbatoi idroelettrici forniti dai rispettivi Enti gestori.

La valutazione dei tempi di ritorno di eventi di piena fluviali con un metodo Montecarlo richiede la generazione sintetica di diverse realizzazioni di significativi campi di precipitazione sul bacino di interesse e la modellazione della sua risposta idrologica con un dettaglio temporale inferiore al tempo caratteristico di risposta. Nel presente lavoro si è scelta una strategia basata su un modello di precipitazione che riproduce i caratteri delle precipitazioni massime annuali e su un modello geomorfologico della risposta idrologica in cui la produzione di deflusso è simulata con schemi tradizionali ancorché sostenuta da informazione distribuita dedotta in remoto.

Il modello utilizzato è un'estensione del modello di Cox & Isham (1988) e si basa sulla descrizione stocastica dei processi che compongono gli eventi di precipitazione. Si è infatti impiegato un processo di generazione (nello spazio e nel tempo) di celle di precipitazione che riproduca la caratteristica struttura a celle convettive degli eventi osservati (Houze, 1981). Il processo di arrivi delle celle è di tipo poissoniano: del numero di celle generate per unità di tempo e del numero di celle per unità di superficie. Ciascuna cella è caratterizzata da dimensioni (raggio) e durata distribuiti secondo leggi esponenziali. Si può mostrare che la struttura degli arrivi adottata induce una correlazione esponenziale della precipitazione nello spazio e nel tempo (Cox & Isham, 1988). Le celle sono caratterizzate da intensità costante per tutta la loro durata la quale, a differenza del modello di Cox & Isham (1988), è caratterizzata da una distribuzione lognormale. Questa scelta è suggerita dalla constatazione che l'uso di una distribuzione ad un solo parametro (e.g. una distribuzione esponenziale come in Cox & Isham, 1988) non conferisce al modello la flessibilità necessaria a riprodurre la varianza spaziale osservata (Rinaldo et al., 2002): che verrebbe altrimenti sottostimata con conseguenze per la riproduzione di eventi estremi. Il modello descritto ha dunque sei

parametri determinati utilizzando le statistiche della precipitazione misurata nelle 17 stazioni pluviografiche. In particolare, sono assegnati: il volume totale di un evento, la sua varianza spaziale (media nel tempo), la scala integrale della correlazione spaziale, la frazione di area asciutta, la varianza temporale, e la correlazione temporale per lag unitario. Data la relativa complessità dello schema di generazione non è possibile ricavare relazioni analitiche che leghino i parametri del modello alle statistiche da riprodurre. La taratura è stata quindi svolta calcolando le statistiche su sequenze di campi sintetici, variando i parametri del modello fino ad ottenere una soddisfacente riproduzione dei valori desunti dalle osservazioni.

Il modello idrologico si basa sulla teoria geomorfologica della risposta idrologica (Rodriguez-Iturbe & Valdes, 1979; Mesa & Mifflin, 1988; Rinaldo & Rodriguez-Iturbe, 1996). Questa si fonda sulla definizione delle distribuzioni di probabilità dei tempi di residenza nei diversi stati (stati versante e stati canale) e su un postulato generale di indipendenza statistica del tempo di residenza in stati morfologicamente diversi. Le distribuzioni dei tempi di residenza in rete sono dedotte analiticamente da uno schema parabolico che include sia fenomeni cinematici che di invaso (Rinaldo et al., 1991). Le complesse sequenze di convoluzioni delle pertinenti densità di probabilità, necessarie alla soluzione dello schema morfologico generale, sono calcolate con algoritmi accurati di trasformata integrale. Le 'path probabilities' sono dedotte direttamente dalle distribuzioni sintetiche o sperimentali delle precipitazioni. La suddivisione rete-versanti è fatta sulla base di un modello digitale del terreno (DEM), con unità d'area di $210 \times 210 \text{ m}^2$, con tecniche automatiche di individuazione della frazione canalizzata del bacino in grado di risolvere ambiguità nella definizione delle direzioni di drenaggio in presenza di topografie divergenti. La descrizione delle proprietà superficiali e di uso del suolo dei sottobacini è ottenuta con algoritmi di estrazione automatica secondo metodi di classificazione di dati multispettrali Landsat ETM 7. In particolare si è utilizzato l'algoritmo di classificazione controllata dello Spectral Angle Mapper, segmentando il territorio in classi di copertura (e.g. boschi, aree urbanizzate, incolto scoperto, aree a pascolo) di interesse idrologico. In base a tale partizione del territorio è possibile determinare i parametri che controllano i processi di formazione dei deflussi. Il modello di produzione di deflusso utilizzato è il metodo del Soil Conservation Service per il quale è possibile legare il valore dei parametri ad osservazioni satellitari. La laminazione delle piene in serbatoi idraulici avviene, infine, a partire dall'idrogramma idrologico in ingresso, integrando l'equazione dei serbatoi per le diverse manovre e geometrie degli scarichi e reimmettendo l'idrogramma in uscita nello schema geomorfologico.

RISULTATI E DISCUSSIONE

La determinazione della risposta idrologica secondo gli schemi postulati richiede la determinazione di due parametri dinamici, uno per la celerità di propagazione nella rete idrografica (potendosi riguardare la dispersione idrodinamica come sostanzialmente ininfluyente in un ampio intervallo di valori fisicamente significativi cfr. Rinaldo et al., 1991) ed uno per i tempi di residenza fuori rete, nonché la taratura dei parametri della produzione di deflusso. I dettagli della procedura, della ottimizzazione dei parametri, del confronto con simultanee misure di campo ed idrologiche e della robustezza delle valutazioni sono in Rinaldo et al. (2002). Quanto ai risultati delle simulazioni e delle previsioni, va osservato che gli idrogrammi delle piene del Brenta hanno spesso forma complessa, caratterizzata da numerosi picchi di origine non idrologica, ma derivanti da importanti utilizzi idroelettrici dei serbatoi e/o dalle manovre agli organi di scarico effettuate dagli Enti gestori: che non possono essere ignorati dalle simulazioni per la loro rilevanza, ben superiore all'errore atteso in ragione delle incertezze che gravano sui parametri idrologici .

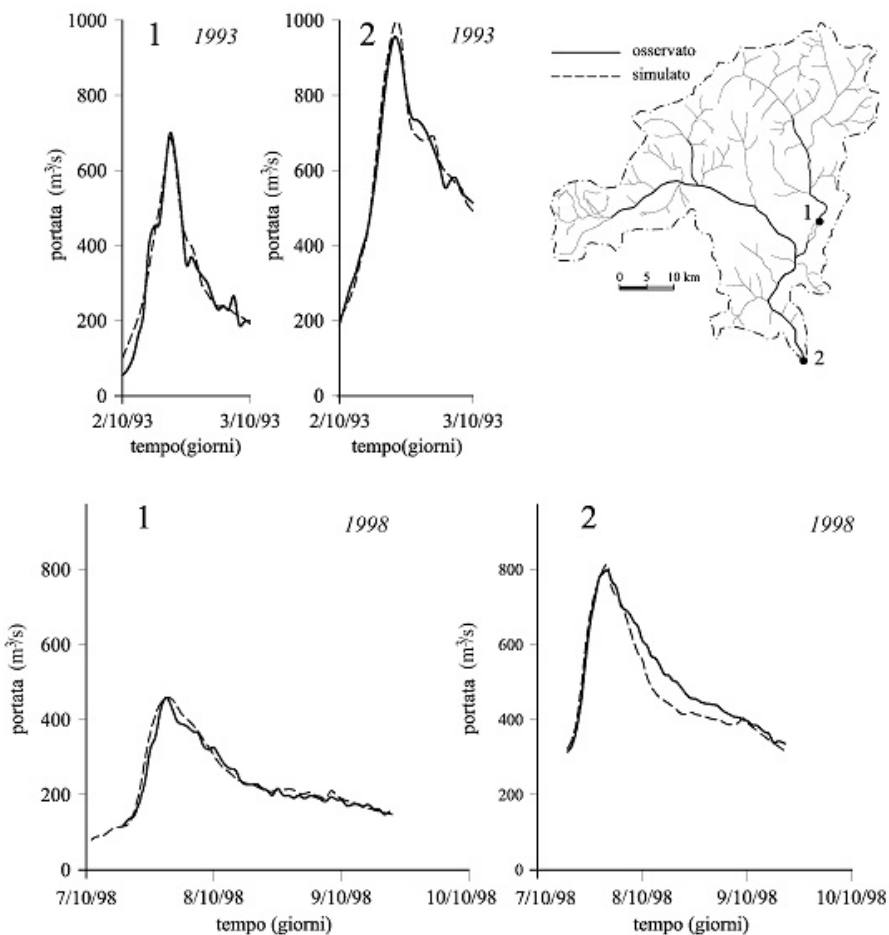


Fig1. Confronto tra portate misurate e modellate per gli eventi di piena di maggiore entità degli anni 1993 e 1998.

Fig1. Comparison between observed and simulated discharge (years 1993 and 1998).

La Figura 1 riporta alcuni idrogrammi osservati e simulati per eventi idrologici significativi dell'ultimo decennio, senza aggiustamenti di sorta rispetto ai parametri ricavati dagli eventi di taratura, in corrispondenza (1) dell'ingresso al serbatoio del Corlo e (2) della sezione di chiusura. Sono da notarsi le diverse caratteristiche degli eventi riprodotti, relativamente sia alla durata dell'evento, che alla portata raggiunta al colmo e ai volumi in gioco.

Il fatto che i valori dei parametri che compaiono nel modello non debbano essere variati per descrivere in modo accurato eventi di piena diversi fra loro indica che il modello matematico riproduce correttamente i processi in gioco piuttosto che adattarsi ai singoli eventi, come spesso accade nel caso di modelli distribuiti. La dimostrata aderenza del modello ai processi idrologici dominanti lo qualifica dunque come uno strumento adatto alla previsione delle piene corrispondenti a precipitazioni qualsiasi, reali o sintetiche, ed alla valutazione di come

diverse gestioni degli invasi artificiali presenti possano incidere sugli idrogrammi di piena che si determinano nella sezione di chiusura in prossimità di Bassano del Grappa.

Il modello stocastico di precipitazione descritto in precedenza (Rinaldo et al. 2002) è stato utilizzato per generare l'equivalente di 200 anni di eventi estremi. Tale procedura è stata effettuata per tutte le durate considerate, di 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 giorni. Il primo passo necessario è stato dunque quello di determinare la durata di precipitazione più critica rispetto al valore al colmo della portata di piena (i.e. la durata più prossima al tempo di concentrazione). Tale determinazione è stata svolta calcolando attraverso il modello la risposta del sistema a tutti gli eventi di tutte le durate considerate e determinando quale durata desse luogo a valori di portata maggiori. Il calcolo è stato svolto supponendo, in favore di sicurezza, che gli eventi di precipitazione generati avessero luogo in condizioni di avvenuta saturazione del bacino ad opera di eventi minori. In altre parole gli eventi generati non solo sono gli eventi massimi annuali quanto a volume totale precipitato (per le ipotesi alla base del modello stocastico) ma sono anche assunti accadere nelle condizioni di imbibizione che danno luogo al maggior deflusso. Dal punto di vista operativo questa assunzione è stata espressa assumendo che il volume inizialmente sottratto alla precipitazione secondo un processo di Dunne fosse nullo (cfr. Rinaldo et al. 2002; anche in Montgomery & Dietrich, 1995, 2002). Si assume dunque, con fondamento empirico nelle simulazioni effettuate, che una volta determinata la durata critica di precipitazione, gli eventi di tale durata divengano anche gli eventi massimi annuali della portata al colmo che si determina alla sezione di chiusura.

È dunque possibile, con tali premesse, procedere alla costruzione di una relazione tra il valore della portata al colmo ed il tempo di ritorno che la caratterizza in modo diretto. È appena il caso di osservare come la conoscenza di tali idrogrammi di piena sia di grande rilevanza per il dimensionamento o per la valutazione dell'efficacia di qualunque opera di difesa dalle piene. Alcuni esempi degli idrogrammi di piena ottenuti per alcuni tempi di ritorno sono riportati nella Figura 2.

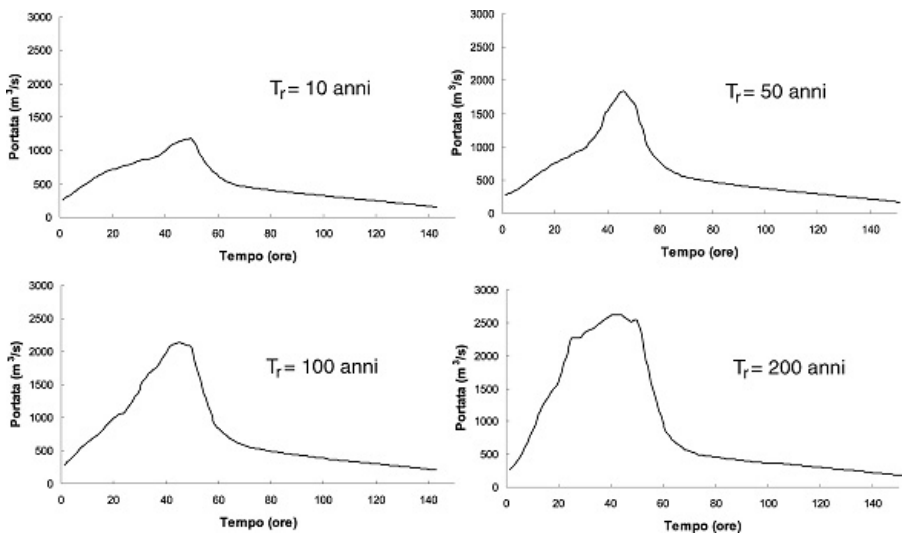


Fig2: Eventi di piena a Bassano generati attraverso il metodo Montecarlo sviluppato per diversi tempi di ritorno.
Fig2: Flood event in Bassano generated with Montecarlo method and different return period.

GLI EFFETTI DI LAMINAZIONE DEL SERBATOIO DEL CORLO

Il modello Geomorfologico-Montecarlo sviluppato rappresenta un importante strumento per la valutazione dell'efficacia di opere di difesa dalle piene e dell'effettiva azione di laminazione esercitata da invasi artificiali in diverse ipotesi di regolazione. Si analizzano, in questo contesto, alla luce degli idrogrammi determinati in precedenza, gli effetti dell'uso (in essere o potenziale) dell'invaso del Corlo ai fini della laminazione delle piene alla chiusura in Bassano. Per valutare la risposta della diga del Corlo a differenti eventi di piena è stata sviluppata una procedura di calcolo che integra l'equazione di continuità dei serbatoi (con una completa descrizione delle scale di deflusso per ogni geometria e manovra degli organi di scarico), in forma discreta e con adatti intervalli di discretizzazione. Inoltre, si è assunta una regola gli scarichi conforme alle intese (Circolare 19 Marzo 1996 n°DSTN/2/7019).

In particolare, le norme di salvaguardia stabilite dall'Autorità di bacino, prevedono che nel periodo 1 novembre -30 novembre di ogni anno il livello dell'acqua nel bacino idroelettrico del Corlo sia portato a quota non superiore a 252 m s.l.m.

Le simulazioni effettuate hanno evidenziato i benefici della delibera in oggetto. Infatti, nonostante la simulazione condotta per l'evento di piena dell'ottobre 1993 (tempo di ritorno di circa 10 anni) abbia mostrato che è possibile laminare la piena con quote iniziali del serbatoio a partire da 262 m s.l.m. (cfr. Figura 3), particolare attenzione dovrebbe essere posta per eventi di minor frequenza di accadimento ma maggiore intensità.

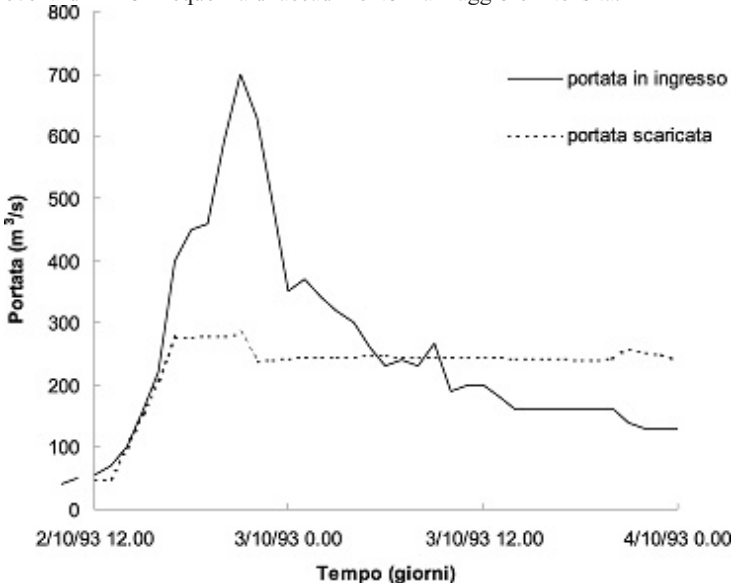


Fig3: Portate in ingresso e in uscita dal serbatoio del Corlo per l'evento di piena dell'ottobre 1993 e quota iniziale di invaso pari a 262 m s.l.m.

Fig3: Discharge issued from Corlo tank (october 1993 and 262 m s.l.m. as initial water level)

I livelli idrometrici del fiume Brenta corrispondenti ad un valore di portata dell'ordine di 1000 m³/s, (misurata alla sezione di Bassano, posta 10 km circa più a valle dell'abitato di Valstagna), rappresentano infatti un valore limite oltre il quale le acque tracimano il muro d'argine che separa l'alveo dalla strada principale in località Valstagna. Al fine di salvaguardare l'abitato, risulta quindi necessario rendere tollerabili le portate scaricabili dal

bacino idroelettrico del Corlo (al più circa $450 \text{ m}^3/\text{s}$) con quelle in alveo del Brenta provenienti dalla Valsugana e dal bacino di monte, la cui somma totale non deve superare la soglia sopra indicata. Allo scopo è stato verificato che il serbatoio, vuotato preventivamente a quota 252 m.s.m., è in grado di laminare in modo decisivo piene con portata al colmo di $T_r=50$ anni, scaricando al massimo circa $410 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 4).

In conclusione, appare chiaro che il serbatoio del Corlo, con i notevoli volumi di invaso che sottende, rappresenta una notevole risorsa per moderare i colmi di piena critici a Bassano. In quale rapporto fra costi di mancata produzione idroelettrica e di gestione e benefici, non è materia di uno studio idrologico - vale solo la pena di segnalare che la dimensione del serbatoio è notevole anche in condizioni idrologiche estreme, e che la risposta del sistema è bene prevedibile.

E' opportuno segnalare che il modello si presta ad applicazioni quali la previsione delle manovre ottimali agli organi di scarico del Corlo ai fini della moderazione massima delle piene. Infatti la previsione (ad esempio, con le nuove generazioni di modelli meteorologici ad area limitata) in tempo reale delle precipitazioni a terra accoppiata al modello idrologico, della cui robustezza s'è detto, permette di prevedere le portate di piena almeno con un giorno di anticipo (Figura 5): in condizioni attuali, ma anche simulando diverse manovre e quanto a possibili e ragionevoli svassi preventivi; ovvero a manovre degli scarichi che minimizzino la portata scaricata a Bassano. Una tale ottimizzazione pare possa provvedere significativi risparmi ad un sistema di gestione che preveda, in sicurezza, di mantenere svasato il serbatoio limitando la produzione idroelettrica. Va osservato che i volumi invasabili nel serbatoio del Corlo, la sua posizione geografica e la peculiare struttura degli organi di scarico della diga possono senz'altro consentire effetti di laminazione a Bassano non trascurabili.

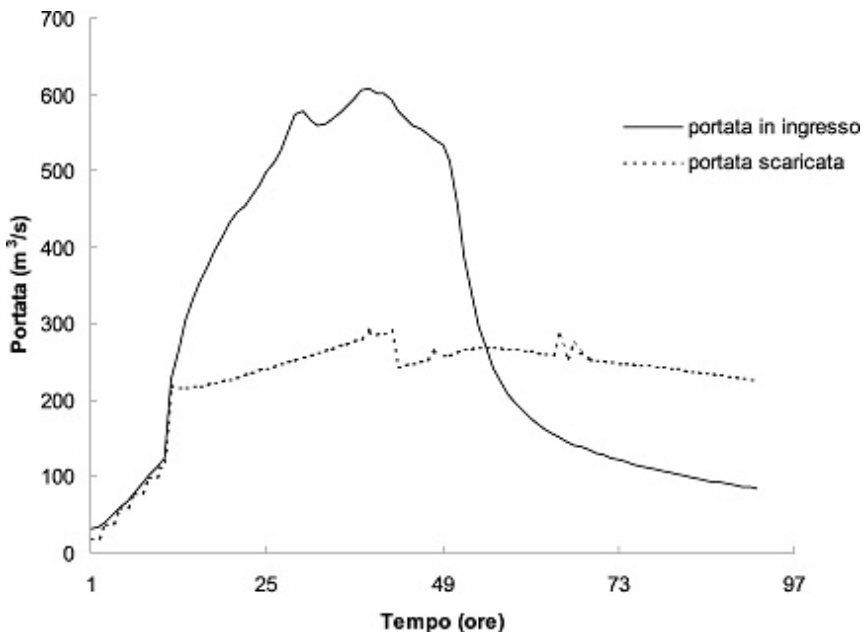


Fig4: Comportamento del serbatoio del Corlo per un evento di piena con tempo di ritorno pari a 50 anni e quota iniziale di invaso pari a 252 m s.l.m.

Fig4: Discharge issued from Corlo tank (50 years as retur period and 252 m s.l.m. as initial water level)

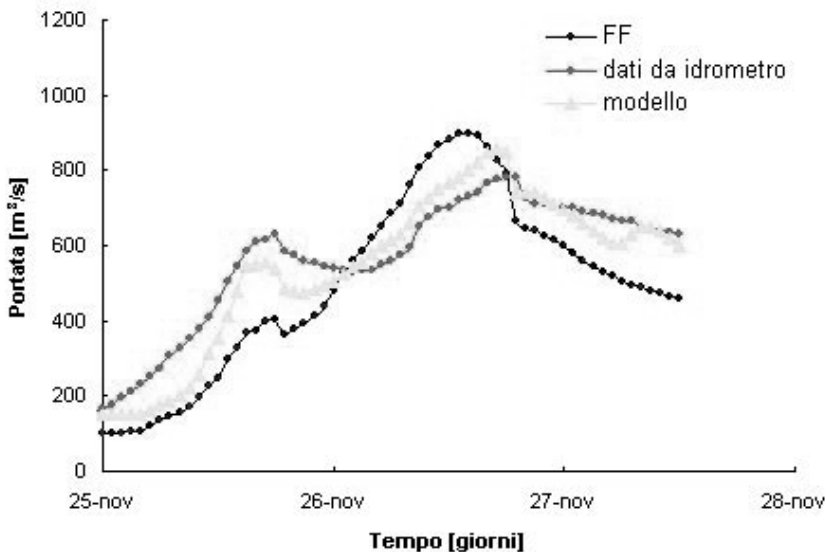


Fig5: Simulazione dell'evento di piena del novembre del 2002 alla sezione di Bassano con piogge reali (MGIUH) e piogge ottenute mediante modello meteorologico di previsione (FF) tre giorni precedenti al colmo di piena.

Fig5: Comparison between discharge in Bassano (november 2002) obtained with both real rain and meteorological prevision model.

BIBLIOGRAFIA

- Cox, D.R., & V. Isham, A simple spatial-temporal model of rainfall, *Proc. R. soc. London, Ser. A*, 415, 317-328, 1988
- Cox, D.R. & H.D. Miller, *The Theory of Stochastic Processes*, Methuen & Co., London, 1965.
- Dagan, G., *Flow and Transport in Porous Formations*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1989.
- Houze, R.A., Structures of atmospheric precipitation systems: A global survey, *Radio Sci.*, 16, 671-689, 1981.
- Howard, A.D., A detachment- limited model of drainage basin evolution, *Water Resour. Res.*, 30(7), 2261-2285, 1994.

- Mesa, O.J., & E.R. Mifflin, On the relative role of hillslope and network geometry in hydrologic response. In: *Scale Problems in Hydrology* (Eds. V.K. Gupta, I. Rodriguez-Iturbe and E.F. Wood), Dordrecht, Holland, 1988
- Montgomery, D.R. & W.E. Dietrich, Channel initiation and the problem of landscape scale, *Science*, 255, 826-830, 1992.
- Rinaldo, A., R. Rigon & A. Marani, Geomorphological dispersion, *Water Resour. Res.*, 27(4), 513-525, 1991.
- Rinaldo, A. & I. Rodriguez-Iturbe, The geomorphological theory of the hydrologic response, *Hydrol. Processes*, 10(6), 803-844, 1996.
- Rinaldo, A., M. Marani, A. Fornasiero, G. Botter, S. Silvestri, A. Bellin & R. Rigon, Modelli geomorfologici-MonteCarlo per la valutazione del tempo di ritorno di piene fluviali: fiume Brenta chiuso a Bassano, XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza, Vol. 3, 35-39, 2002
- Rodriguez-Iturbe, I. & J.B. Valdes, The geomorphologic structure of hydrologic response, *Water Resour. Res.*, 15(6), 1409-1420, 1