

STIMA DELLE PRESTAZIONI DI UNA VASCA DI LAMINAZIONE: CONFRONTO TRA SIMULAZIONI CONTINUE E METODI ANALITICO-PROBABILISTICI

M. Balistrocchi¹, B. Bacchi¹ & G. Grossi¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile Architettura Territorio e Ambiente (DICATA), Università di Brescia, Brescia, Italia, e-mail: *matteo.balistrocchi@unibs.it, baldassare.bacchi@unibs.it, giovanna.grossi@unibs.it.*

SOMMARIO

I metodi di progetto delle vasche di laminazione basati sull'evento critico presentano diversi limiti. Il più rilevante risiede nella difficoltà di tenere in considerazione la naturale variabilità delle piene e la loro successione temporale. Le simulazioni di lungo periodo ed i metodi analitico-probabilistici sono invece in grado di ovviare efficacemente a questo inconveniente. In riferimento ad un caso di studio, sono state ricavate mediante questi due diversi approcci le distribuzioni di frequenza delle portate di picco prodotte dal bacino naturale e quelle laminate da un invaso artificiale. Il loro confronto ha evidenziato alcuni limiti del secondo metodo, che tuttavia sembra meritevole di ulteriore approfondimento.

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni la considerevole espansione delle aree urbane, dei centri commerciali e degli insediamenti produttivi in alcune regioni italiane ha incrementato a dismisura l'esposizione delle opere umane nei confronti delle piene. Tale crescita si è manifestata in modo particolarmente elevato nella parte settentrionale della Pianura Padana, dove è possibile osservare un ambiente antropizzato pressoché continuo lungo ogni via di comunicazione.

Il cambiamento di uso del suolo ha in generale prodotto da un lato la diminuzione della capacità di deflusso della rete di drenaggio naturale, a causa delle sue manomissioni, dall'altro l'incremento dell'impermeabilità delle aree scolanti, la diminuzione dei tempi di formazione delle piene e l'aumento del loro volume. Una delle strategie di intervento più attuali, che si pone come obiettivo la compensazione degli effetti dell'urbanizzazione sul ciclo idrologico, propone l'introduzione di vasche di laminazione, intese come serbatoi artificiali o più semplicemente come aree di spaglio appositamente delimitate (Walesh, 1989; US EPA, 1993; ASCE & WEF, 1998).

I metodi pratici di progetto di questi dispositivi sono stati sviluppati nel tentativo di individuare un evento critico (Supino, 1965), analogamente a quanto prima proposto per i canali di drenaggio. Secondo questo approccio, una volta stabilita la linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per il tempo di ritorno prescelto, nonché la forma dello ietogramma di progetto, si ricerca la durata di pioggia che massimizza il volume da

invasare per poter soddisfare il limite sulla portata avviabile a valle senza danni. La concettualizzazione dei processi idrologici ed idraulici coinvolti nella laminazione è però contraddistinta da ipotesi semplificative alquanto restrittive e non sempre cautelative.

In questo senso si possono ricordare i criteri di dimensionamento basati sulle sole piogge, sul metodo dell'invaso (*Paoletti & Rege Gianas, 1979*) e sul metodo della corrivazione (*Alfonsi & Orsi, 1987*), nei quali si assumono intensità di precipitazione netta e portata uscente dalla vasca costanti. Simulazioni di lungo periodo hanno evidenziato come nel primo caso si ottengano, in ragione del tempo di corrivazione trascurato nella procedura, volumi d'invaso sia in eccesso che in difetto rispetto a quelli necessari, mentre nei rimanenti essi siano sistematicamente sottostimati (*Mambretti, 1991*). Queste metodologie sono state pertanto ulteriormente perfezionate (*Modica, 1996*), impiegando ietogrammi ad intensità variabile e leggi di efflusso a battente o a stramazzo, ottenendo significativi miglioramenti nella stima delle capacità d'invaso.

In questo tipo di applicazione, tuttavia, l'adozione di un approccio basato sul concetto di evento critico appare discutibile. In via del tutto generale, esso è affetto da un errore concettuale derivante dal presupporre il tempo di ritorno della sollecitazione meteorica coincidente con quello dell'idrogramma di piena generato (si veda ad esempio, *Bacchi et al., 1993*).

In aggiunta, più specificatamente per questa applicazione, l'efficienza offerta dal dispositivo d'invaso è valutata solo in riferimento ad un unico evento il quale, seppure tipico e severo, non tiene conto della possibile interazione con altri eventi ravvicinati. Ciò significa, di fatto, ammettere che la vasca sia inizialmente vuota ed il volume d'invaso sempre interamente disponibile: qualora si verificassero degli eventi consecutivi ciò potrebbe determinare una significativa sovrastima della capacità di laminazione.

Appare pertanto opportuno affrontare il problema del dimensionamento mediante un approccio continuo, in modo da sollecitare l'invaso nei confronti di una pluralità di eventi aventi diverso tempo di ritorno, tenendo altresì in considerazione la loro effettiva successione temporale. I metodi in grado di operare agevolmente in questa direzione sono le simulazioni continue e le tecniche analitico-probabilistiche (*Adams & Papa, 2000*). Il secondo, in particolare, consente di derivare, sotto alcune ipotesi semplificative non più gravose di quelle adottate nei metodi tradizionali, le distribuzioni di probabilità delle portate di picco in ingresso ed in uscita dalla vasca; ciò permette, quantomeno, di stimarne il tempo di ritorno in modo concettualmente corretto.

Nel tentativo di valutarne le potenzialità, un semplice modello stocastico di pioggia è stato abbinato ad uno schema semplificato di rappresentazione dei processi di trasformazione afflussi-deflussi e di laminazione. Il modello derivato è stato poi applicato ad un caso di studio relativo al torrente Garza che, originato dalle colline poste immediatamente a nord della città di Brescia, ne circonda quasi interamente il centro storico per poi allontanarsi verso sud nella pianura bresciana. Per questo corpo idrico, che immediatamente a monte del suo ingresso nell'area urbana è caratterizzato da un bacino di 57 km², è stata progettata una vasca di laminazione di capacità complessiva di circa 200000 m³ con riferimento ad un evento di progetto cinquantennale.

Di seguito, i risultati del modello analitico-probabilistico sono stati confrontati con quelli ricavati da simulazioni continue, in modo da verificarne l'attendibilità, e con quelli derivati dal metodo tradizionale.

2 METODOLOGIA ANALITICO-PROBABILISTICA

L'applicazione dei metodi analitico-probabilistici richiede un'analisi statistica delle precipitazioni basata sulla separazione di serie continue sufficientemente lunghe di registrazioni di pioggia in singoli eventi indipendenti. Questa analisi è generalmente condotta utilizzando una soglia per il tempo di interevento IETD ed una per l'altezza di pioggia IA, al di sopra della quale si produce un vero evento di piena.

Il primo parametro rappresenta il periodo minimo di tempo asciutto che deve trascorrere tra due scrosci successivi perché possano essere assunti indipendenti l'uno dall'altro (Adams & Papa, 2000, pp. 55-59), mentre il secondo coincide con la sottrazione iniziale prodotta dalle perdite idrologiche di bacino e si utilizza per eliminare gli eventi che producono un deflusso poco significativo, o addirittura nullo (Chow *et al.*, 1988, pp. 147-155).

La precipitazione può quindi essere rappresentata mediante un semplice processo stocastico nel quale sono impiegate tre variabili casuali: il volume e la durata di pioggia ed il periodo asciutto di interevento. Per la derivazione delle distribuzioni delle portate di picco entranti ed uscenti da una vasca di laminazione è necessario definire le funzioni di probabilità del volume v e della durata t . Una coppia di distribuzioni marginali che si adatta alle caratteristiche climatiche italiane è data dalle relazioni seguenti.

$$P_{V(v)} = 1 - e^{-\left(\frac{v-IA}{\zeta}\right)^\beta} \quad \text{se } v \geq IA, \quad P_{T(t)} = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)} \quad \text{se } t \geq 0 \quad (1)$$

Come mostrato in ricerche precedenti (Balistrocchi, 2007), la probabilità di non superamento P_V della variabile v può essere espressa da una funzione di Weibull a tre parametri, dove IA denota il limite inferiore della distribuzione, β il parametro di forma e ζ quello di scala; una più semplice funzione esponenziale, il cui parametro λ coincide con la media teorica, è invece abbastanza idonea per descrivere la probabilità di non superamento P_T della durata t .

È noto da tempo come queste due variabili siano in generale tra loro statisticamente dipendenti (Eagleson, 1970, p. 186). Tuttavia, per poter integrare analiticamente le distribuzioni delle variabili dipendenti, come già effettuato da numerosi autori in passato (Eagleson, 1972; Guo & Adams, 1999; Bacchi *et al.*, 2002), si è ritenuto opportuno adottare come ipotesi operativa l'indipendenza di queste grandezze.

Nell'ottica dello sviluppo di una metodologia progettuale di tipo pratico, le perdite idrologiche possono essere computate utilizzando un modello di depurazione semplificato, ma che approssimi comunque la loro progressiva riduzione durante il corso di un evento meteorico. Il volume di deflusso superficiale v_r è quindi valutabile come indicato nell'equazione (2), applicando cioè un coefficiente di afflusso costante Φ alla porzione di volume v eccedente la sottrazione iniziale IA.

$$v_r = \Phi (v - IA) \quad (2)$$

Come suggerito precedentemente da Wycoff & Singh (1976), gli idrogrammi delle portate entranti ed uscenti dalla vasca sono stati assimilati ai triangoli mostrati in figura 1. Imporre una forma prefissata per gli idrogrammi costituisce ovviamente un'ipotesi piuttosto restrittiva, che risulta accettabile solo se l'obiettivo è quello di stimare il valore di picco di un evento di piena significativo. Al contrario, implementare nel

procedimento di derivazione delle distribuzioni un modello di convoluzione, per quanto semplice e concettuale, conduce a soluzioni analitiche decisamente complesse o a funzioni integrabili solo numericamente.

Osservando la figura 1 si può dedurre l'espressione (3), nella quale la portata di picco Q_{pe} prodotta dal bacino contribuente viene posta in relazione al volume ed alla durata del deflusso, quest'ultima calcolata come somma della durata dell'evento meteorico t e del tempo di corrivazione t_c .

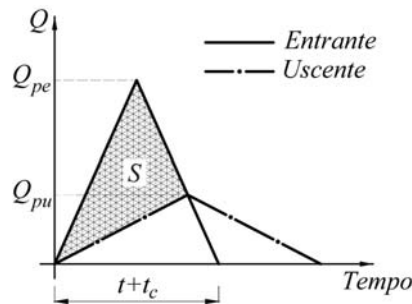


Figura 1. Idrogrammi semplificati delle portate entranti ed uscenti dalla vasca di laminazione.

$$Q_{pe} = \frac{2 v_r}{t + t_c} = \frac{2 \Phi (v - IA)}{t + t_c} \quad (3)$$

Questa equazione, rappresentando una funzione crescente in v e decrescente in t , soddisfa le ipotesi richieste dalla teoria delle distribuzioni derivate, la cui applicazione permette di scrivere le uguaglianze (4). La probabilità di non superamento $P_{Q_{pe}}$ della portata di picco entrante è quindi data dalla funzione (5), purché si adotti l'esponente β pari all'unità; come sarà mostrato in seguito, tale scelta è giustificata dai valori di taratura del parametro per questo tipo di applicazione.

$$P_{Q_{pe}(q_{pe})} = \text{Prob} \left\{ Q_{pe} \leq q_{pe} \right\} = \text{Prob} \left\{ v \leq q_{pe} \frac{t + t_c}{2 \Phi} + IA \right\} \quad (4)$$

$$P_{Q_{pe}(q_{pe})} = 1 - \frac{2 \Phi \zeta}{q_{pe} \lambda + 2 \Phi \zeta} \exp \left[- \left(\frac{q_{pe} t_c}{2 \Phi \zeta} \right) \right] \quad (5)$$

Riferendosi ancora agli idrogrammi illustrati in figura 1, il volume S , che deve essere invasato per ridurre la portata di picco da Q_{pe} a Q_{pu} , è dato dalla differenza tra le aree di due triangoli aventi la stessa base $(t+t_c)$.

$$S = \frac{1}{2} (Q_{pe} - Q_{pu}) (t + t_c) \quad (6)$$

La teoria delle distribuzioni derivate consente ancora di valutare la probabilità di non superamento $P_{Q_{pu}}$, come mostrato dalle equazioni (7) ed (8) seguenti:

$$P_{Q_{pu}(q_{pu})} = \text{Prob} \left\{ Q_{pu} \leq q_{pu} \right\} = \text{Prob} \left\{ v \leq \frac{q_{pu} (t + t_c) + 2S}{2\Phi} + \text{IA} \right\} \quad (7)$$

$$P_{Q_{pu}(q_{pu})} = 1 - \frac{2\Phi\zeta}{q_{pu}\lambda + 2\Phi\zeta} \exp \left[- \left(\frac{q_{pu} t_c}{2\Phi\zeta} + \frac{q_{pu} S}{\Phi\zeta} \right) \right] \quad (8)$$

3 CASO DI STUDIO

La metodologia analitico-probabilistica è stata applicata ad una vasca di laminazione fuori linea progettata per la protezione idraulica della periferia settentrionale della città di Brescia dalle piene del torrente Garza (*Taccolini & Bacchi, 2001*). Questo corpo idrico naturale nasce dalle colline prealpine a nord dell'area urbana, possiede un bacino imbrifero di circa 57 km² ed è contraddistinto da pendenze molto elevate, talvolta superiori al 60%. Nel tratto pedemontano esso attraversa un'area intensamente urbanizzata dove è costretto in sezioni ridotte o tombinato allo scopo di sottopassare fabbricati realizzati sul suo alveo, per poi essere ridotto ad un canale sotterraneo che attraversa la parte settentrionale della città in direzione nord-sud. La posizione della vasca di laminazione è stata individuata in un'area di fondovalle immediatamente a monte del perimetro urbano, come mostrato in figura 2a. Qui la superficie contribuyente ammonta a 53 km², mentre la lunghezza dell'asta principale a 18 km.

Le elevate pendenze del terreno determinano tempi di risposta piuttosto rapidi: seguendo la formulazione di *Bacchi et al. (1999)*, che hanno analizzato numerosi eventi di piena nella provincia di Brescia, il tempo di corrivazione t_c (h) è stato valutato per mezzo dell'espressione (9), in funzione dell'area drenata A (km²), della lunghezza dell'asta principale L (km) e del dislivello ΔH (m) tra la quota media e quella della sezione di chiusura. Il dislivello di oltre 390 m conduce ad un tempo t_c di 3,6 h.

$$t_c = \frac{3,3\sqrt{A} + 3,2L}{\sqrt{\Delta H}} \quad (9)$$

Il volume d'invaso da attribuire alla vasca è stato dimensionato seguendo una metodologia basata su un evento di progetto il cui ietogramma è stato ricavato dalla linea segnalatrice di possibilità pluviometrica $h = 54,71 d^{0,33}$ (*Bacchi et al., 1995*), dove h (mm) è l'altezza e d (h) la durata, corrispondente ad un tempo di ritorno di 50 anni e relativa al pluviometro ITAS Pastori (Brescia), localizzato pochi chilometri a sud del bacino del torrente Garza. L'altezza puntuale di pioggia lorda è stata quindi ragguagliata all'area utilizzando il fattore di riduzione proposto da *Moisello & Papiri (1986)*.

La distribuzione temporale dell'intensità di pioggia è stata invece modulata secondo il modello dello ietogramma Chicago (si veda ad esempio *Chow et al., 1988*), adottando una durata doppia rispetto al tempo di corrivazione, allo scopo di operare con una piena di volume significativo. La depurazione dalle perdite idrologiche è stata effettuata mediante il metodo SCS-CN (*Soil Conservation Service, 1972*) ipotizzando condizioni di umidità media per il bacino (AMC II); il valore del parametro CN, stimato in

precedenti studi (Natale, 1994), è stato assunto pari a 75. Le piogge nette ragguagliate così ottenute sono state poi trasformate in deflussi tramite un modello di Nash (Nash, 1957), formato da due serbatoi lineari in serie aventi la medesima costante d'invaso k .

Il valore di quest'ultima è stato calcolato in funzione del tempo di corrivazione t_c secondo l'equazione (10), basata sulla similitudine di risposta tra modello di Nash e modello cinematico con curva area tempi parabolica, che si ottiene uguagliando i picchi dei rispettivi idrogrammi unitari istantanei (Bacchi et al., 1989). Tale equazione, in cui n è il numero di serbatoi e $\Gamma(\cdot)$ il fattoriale generalizzato, consente di assegnare alla costante k il valore di 0,77 h.

$$k = \frac{t_c \Gamma(n)}{2(n-1)^{n-1} e^{-(n-1)}} \quad (10)$$

Le portate al colmo di piena prodotte da questo modello idrologico, in assenza di osservazioni idrometriche dirette, sono state verificate per confronto con quelle desumibili da un'analisi regionale, basata sul metodo index-flood e riferita a bacini montani della provincia bresciana di caratteristiche simili (Bacchi et al., 1999). Tali valori sono stati peraltro suffragati da indagini in sito sull'entità delle esondazioni verificatesi in concomitanza di recenti piene (anni 1992 e 1993).

Lo schema di funzionamento della vasca, illustrato in figura 2b, prevede un volume d'invaso fuori linea di capacità 200000 m³ alimentato mediante uno sfioratore laterale abbinato ad una paratoia trasversale, dimensionata in modo da consentire ad una portata di 65 m³/s di proseguire indisturbata verso valle senza interessare il dispositivo. Il rilascio dei volumi intercettati avviene principalmente attraverso uno scarico costituito da tre condotte circolari di diametro 600 mm; sono inoltre previsti uno scarico superficiale di sicurezza ed un sistema di pompaggio per completare lo svuotamento una volta esaurita la piena.

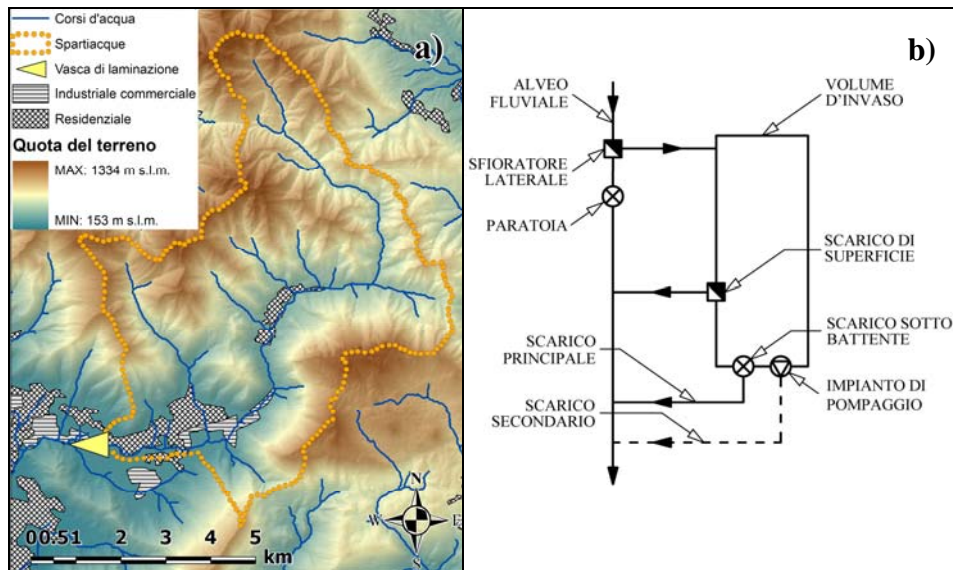


Figura 2. Bacino contribuente a) e schema idraulico b) della vasca di laminazione.

La simulazione idraulica del processo di laminazione operato da questo sistema assicura che, per il tempo di ritorno di progetto pari a 50 anni, la portata di picco in ingresso sia ridotta da 94 m³/s a 74 m³/s, valore ritenuto sufficiente a garantire la sicurezza idraulica a valle del manufatto (Taccolini & Bacchi, 2001).

3.1 Costruzione del modello di simulazione

Le simulazioni dei processi di trasformazione afflussi-deflussi che avvengono nel bacino sono state condotte implementando i dati idrologici e pluviometrici in un modello concentrato, ricavando così la serie continua delle portate in ingresso alla vasca di laminazione. In questa operazione è stata impiegata la serie temporale di precipitazioni del pluviometro ITAS Pastori di Brescia, registrata a scansione semioraria nel periodo 1949÷1993 e già impiegata per la definizione della linea segnalatrice di possibilità climatica. Il regime pluviometrico corrisponde al clima sub-litoraneo alpino e, per questa stazione, la precipitazione media annua è di oltre 900 mm.

Le precipitazioni lorde, seguendo il modello semplificato (2), sono state depurate dalle perdite idrologiche applicando una perdita iniziale IA di 17 mm ed un coefficiente di afflusso Φ di 0,25. Il primo parametro è stato calcolato tramite il criterio del *Soil Conservation Service* (1972) in funzione del valore del CN medio del bacino, assunto pari a 75; il secondo invece è stato calibrato in modo da ottenere per il tempo di ritorno di 50 anni una portata di picco entrante prossima ai 94 m³/s dell'idrogramma di progetto.

Le altezze di pioggia efficace sono state successivamente trasformate in portate di deflusso superficiale mediante il medesimo modello di Nash precedentemente descritto. Quelle laminate a valle della vasca sono state invece ricavate tramite un modello idraulico dello schema di figura 2b, basato sulle note leggi di conservazione della massa e di efflusso applicabili ai dispositivi d'invaso, assumendo che lo scarico potesse avvenire anche durante il corso dell'evento di piena; in questa fase è stato anche stimato il tempo medio di residenza dei volumi invasati.

3.2 Calibrazione del modello analitico-probabilistico

La calibrazione del modello analitico-probabilistico è consistita nella stima dei parametri delle distribuzioni di probabilità (1), partendo dalla serie di precipitazioni descritte. Essi sono fortemente influenzati da quelli adottati nella fase di individuazione degli eventi indipendenti, IETD ed IA (Bacchi *et al.*, 2008). Quindi, per assicurare l'affidabilità del modello analitico-probabilistico è conveniente fissarne i valori in relazione ai processi fisici che si vogliono rappresentare (Balistrocchi *et al.*, 2009).

Se l'altezza IA ha un significato abbastanza chiaro, essendo la perdita idrologica iniziale, valutata nel nostro caso mediante il metodo pratico SCS-CN in 17 mm, il tempo IETD deve essere interpretato come il minimo necessario affinché i deflussi prodotti da eventi adiacenti non interagiscano in maniera significativa tra loro. In questo modo è possibile assicurarsi che la condizione iniziale di vasca vuota sia mediamente soddisfatta al sopraggiungere di un nuovo evento di piena. Se ciò non avvenisse, il modello analitico-probabilistico sovrastimerebbe sistematicamente l'efficienza del dispositivo.

Per la taratura della funzione di probabilità (5) delle portate in ingresso alla vasca di laminazione lo IETD è stato perciò fissato in 4 h, cioè di poco superiore al tempo di corrivazione, mentre per la funzione di probabilità (8) delle portate di picco laminate

esso è stato incrementato del tempo medio di svuotamento della vasca, stimato grazie alle simulazioni, ottenendo un valore di 48 h. La tabella 1 propone i valori dei parametri delle distribuzioni (1) e del numero medio di eventi annuo θ_p per gli intervalli di IETD e di IA di interesse. Come si può osservare dalle stime dell'esponente β , in questa particolare situazione climatica e con le soglie di durata ed altezza prescelte, l'adozione di un valore unitario per tale parametro appare sostanzialmente lecita.

IETD (h)	3		6		12		24		48	
IA (mm)	15	20	15	20	15	20	15	20	15	20
β (l)	0,94	0,89	0,91	0,87	0,91	0,87	0,91	0,91	0,93	0,93
ζ (mm)	14,0	14,1	15,8	15,8	18,0	18,3	21,9	23,1	29,8	30,8
λ (h)	12,9	14,0	19,1	20,8	28,4	31,1	47,2	52,1	93,4	103,0
θ_p (n/anno)	17,9	12,3	19,6	14,1	20,3	15,1	19,9	15,4	17,9	14,8

Tabella 1. Variabilità in ragione di IETD ed IA dei parametri delle distribuzioni (1).

4 ANALISI DEI RISULTATI

Le serie continue di portate così ottenute sono state poi analizzate allo scopo di costruire le curve di frequenza dei picchi; ciò è stato effettuato mediante due metodologie alternative. La prima, basata sulla statistica dei singoli eventi indipendenti IES (*Individual Event Statistics*), richiede la determinazione del numero medio annuo di piene θ_Q , nonché dei valori di picco corrispondenti a ciascuna di esse.

Il tempo di ritorno può quindi essere calcolato tramite la relazione (11a), nella quale F_Q indica la frequenza cumulata relativa delle portate di picco. Una seconda distribuzione campionaria è stata ricavata eseguendo la tradizionale statistica dei massimi annuali AMS (*Annual Maximum Statistics*), andando ad estrarre dalla serie delle portate di picco la maggiore di ogni anno.

Le frequenze F'_Q stimate secondo questa procedura sono legate al tempo di ritorno dalla nota relazione (11b), essendo in questo caso il numero medio di eventi annui uguale ad uno. L'equazione (11a), sebbene più rigorosa della (11b), presuppone la definizione di un tempo di intervento per l'identificazione degli eventi di piena indipendenti: al fine di assicurare la coerenza tra le metodologie, si sono impiegati gli stessi IETD di 4 h e 48 h adottati, rispettivamente, per la taratura delle funzioni di probabilità delle portate di picco in ingresso e laminate.

$$a) T = \frac{1}{\theta_Q (1 - F_Q)} \quad b) T = \frac{1}{1 - F'_Q} \quad (11)$$

Una prima verifica è stata effettuata calcolando il numero medio annuo di eventi di piena θ_q , il quale, nella formulazione analitico-probabilistica adottata, deve coincidere con il numero medio annuo di eventi pluviometrici efficaci θ_p . Il valore di θ_q che si ottiene è pari a circa 16,6 eventi annui per entrambe le serie di idrogrammi simulati ed è del tutto compatibile con i valori medi di θ_p riportati in tabella 1. Il confronto più importante è tuttavia quello riportato in figura 3, dove le stime delle portate di picco

derivate secondo le tre diverse metodologie, metodo di progetto, metodo analitico-probabilistico e simulazioni continue, sono riportate in funzione del tempo di ritorno.

Nel caso delle portate di picco entranti Q_{pe} , figura 3a, la curva analitico-probabilistica si adatta molto bene alla distribuzione di frequenze campionarie dedotte dalle simulazioni analizzate mediante la statistica IES. La curva di frequenza che si ricava invece dalla statistica AMS produce, in accordo con risultati già noti, per piccoli tempi di ritorno portate di picco inferiori, mentre per valori superiori ai 10 anni essa tende a sovrapporsi alle altre due. Rispetto alle portate di picco stimate per mezzo della metodologia dell'evento di progetto (MP in figura 3), la curva analitico-probabilistica produce risultati leggermente più cautelativi per i tempi di ritorno di 10 e 20 anni.

Il grafico di figura 3b) mostra invece risultati meno soddisfacenti per le portate al colmo laminare Q_{pu} .

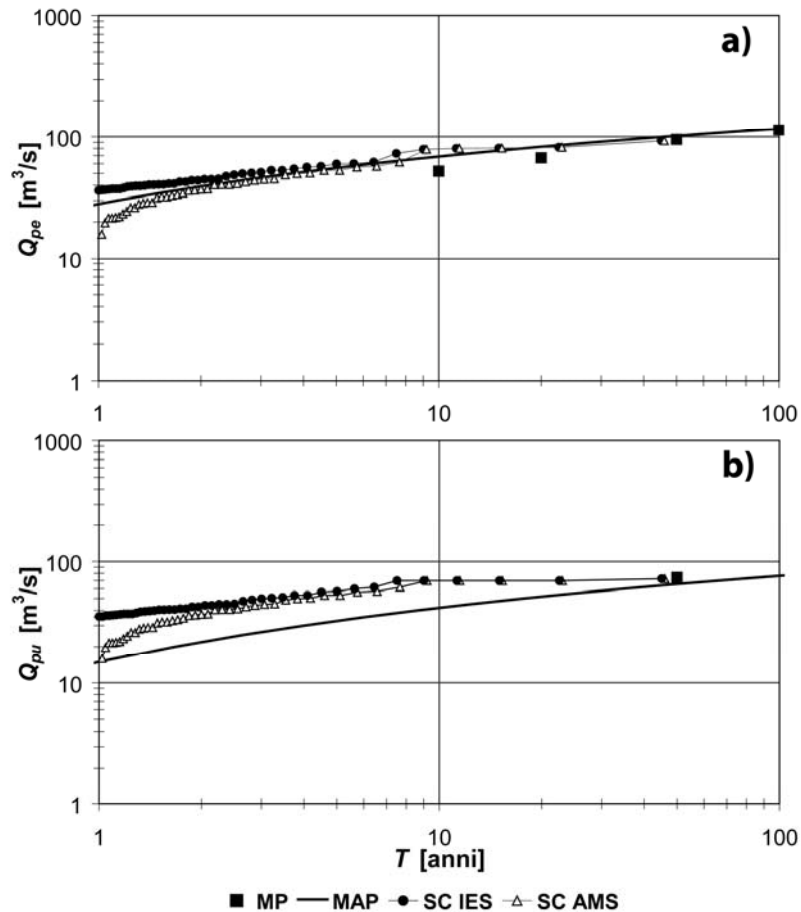


Figura 3. Portate di picco entranti a) ed uscenti b) in ragione del tempo di ritorno T ricavate dal metodo dell'evento di progetto (MP) (Taccolini & Bacchi, 2001), dal metodo analitico-probabilistico (MAP), e dalle simulazioni continue (SC) analizzate statisticamente secondo le procedure IES e AMS.

Sebbene la portata desunta dal metodo dell'evento critico, e confermata dalle simulazioni continue, sia riprodotta in modo abbastanza soddisfacente dal metodo analitico-probabilistico, la funzione di probabilità da esso delineata non coglie l'andamento della distribuzione campionaria, sia che essa venga stimata per mezzo del criterio IES sia con quello AMS. Ciò appare sostanzialmente imputabile all'installazione fuori linea dell'invaso, il cui effetto di laminazione dei colmi si manifesta solo per portate di picco superiori a circa 65 m³/s. Infatti, come si può osservare confrontando i risultati delle simulazione dei quadri a) e b), sino a che tale valore non viene superato le distribuzioni risultano identiche.

5 CONCLUSIONI

La metodologia analitico-probabilistica atta al dimensionamento di vasche di laminazione qui illustrata, sviluppata sulla scorta di precedenti proposte (Bacchi *et al.*, 2002; Guo & Adams, 1999), è stata applicata ad un caso di studio reale e quindi verificata mediante simulazioni continue di lungo periodo. I risultati hanno mostrato una soddisfacente capacità del metodo di rappresentare la distribuzione di probabilità delle portate al colmo di piena prodotte da un bacino naturale. Per quanto concerne invece quelle laminate, essa si è dimostrata meno efficace sebbene, per gli usuali tempi di ritorno di progetto di questi invasi, i valori che si ottengono siano ugualmente congruenti.

In questo caso infatti (cfr. figura 3), viene a mancare l'adattamento globale della distribuzione derivata alle curve di frequenza dedotte dalle simulazioni continue; la possibilità di ricostruire interamente la funzione di probabilità delle variabili dipendenti costituisce peraltro uno dei principali vantaggi di questo metodo. Il problema sembra risiedere nella rappresentazione sintetica del processo di laminazione proposta da Wycoff & Singh (1976), che si presta maggiormente a schematizzare l'effetto di un dispositivo in linea piuttosto che quello di uno fuori linea.

Appare quindi interessante un ulteriore approfondimento della metodologia: la direzione principale dovrebbe essere quella di implementare nella derivazione della distribuzione delle portate al colmo uscenti un diverso idrogramma laminato, in cui la portata scaricata a valle rimanga sostanzialmente costante durante l'evento, come avviene per le vasche fuori linea. Un ulteriore affinamento potrebbe derivare dall'incorporare nel modello probabilistico delle piogge la struttura di dipendenza che lega le variabili volume e durata di precipitazione. Tali approfondimenti risultano però difficoltosi a causa dell'intrattabilità analitica del problema.

BIBLIOGRAFIA

- Adams, B.J. & Papa, F. Urban stormwater management planning with analytical probabilistic models, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- Alfonsi, G. & Orsi, E. Proporzionamento della vasche di laminazione per reti fognarie sulla base del metodo cinematico, *Idrotecnica*, 1987, 2, 65-68.
- ASCE & WEF. Urban Runoff Quality Management. ASCE manuals and report on engineering practice n° 87, ASCE, Reston, VA, 1998.
- Bacchi, B., Larcán, E. & Rosso, R. Stima del fattore di attenuazione per la valutazione del colmo di piena prodotto da piogge efficaci di durata finita ed intensità costante, *Ingegneria Sanitaria*, 1989, 1, 6-15.

- Bacchi, B., Brath, A. & Maione, U. Sul dimensionamento delle reti di drenaggio con la metodologia dell'evento critico, *Idrotecnica*, 1993, 1, 33-43.
- Bacchi, B., Mariani, M. & Ranzi, R. Analisi delle piogge intense e forte intensità a scala regionale: Pianura Padana, Valtellina e Orobie, DICATA Technical Report, Università di Brescia, Brescia, 1995.
- Bacchi, B., Armanelli, B. & Rossini, E. Valutazione delle portate di piena della provincia di Brescia, DICATA Technical Report, Università di Brescia, Brescia, 1999.
- Bacchi, B., Grossi, G. & Ranzi, R. Un metodo semiprobabilistico per il dimensionamento degli invasi di laminazione, *Atti del XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Potenza, 16-19 settembre 2002.
- Bacchi, B., Balistrocchi, M. & Grossi, G. Proposal of a semi-probabilistic approach for storage facility design, *Urban Water J.*, 2008, 5(3), 195-208.
- Balistrocchi, M. Applicazione di metodi semiprobabilistici al progetto ed alla gestione di opere di drenaggio urbano, Tesi di Dottorato, Politecnico di Milano, Milano, 2007.
- Balistrocchi, M., Grossi, G. & Bacchi, B. An analytical probabilistic model of the quality efficiency of a sewer tank, *Water Resour. Res.*, 2009, 45, W12420.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. Applied hydrology, McGraw-Hill International Edition, New York, 1988.
- Eagleson, P.S. Dynamic hydrology, McGraw-Hill, New York, 1970.
- Eagleson, P.S. Dynamics of flood frequencies, *Water Resour. Res.*, 1972, 8(4), 878-898.
- Guo, Y. & Adams, B.J. An analytical probabilistic approach to sizing flood control detention facilities, *Water Resour. Res.*, 1999, 35(8), 2457-2468.
- Mambretti, S. Metodi pratici per il dimensionamento delle vasche di laminazione in ambiente urbano, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, Milano, 1991.
- Modica, C. Il dimensionamento della vasche volano per piogge di intensità variabile e per diversi dispositivi di scarico, *Atti del XXV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Torino, 16-18 settembre 1996.
- Moisello, U. & Papiri, S. Relazione tra altezza di pioggia puntuale e ragguagliata, *Atti del XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Padova, 8-10 settembre 1986.
- Nash, J.E. The form of the instantaneous unit hydrograph, *IAHS publication 45*, 3-4, 114-121, 1957.
- Natale, L. Studio idrologico idraulico del bacino del torrente Garza, Rapporto per la Regione Lombardia, Milano, 1994.
- Paoletti, A. & Rege Gianas, F. Il dimensionamento delle vasche volano nelle reti di fognatura, *Ingegneria Sanitaria*, 1979, 1, 5-10.
- Soil Conservation Service. National engineering handbook, section 4: hydrology, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1972.
- Supino, G. Le reti idrauliche, Patron Editore, Bologna, 1965.
- Taccolini, S. & Bacchi, B. Torrente Garza: vasca volano nel comune di Nave, Rapporto di progetto per la Regione Lombardia, Milano, 2001.
- US EPA. Handbook urban runoff pollution prevention and control planning (EPA/625/R-93/004), USEPA, Washington, DC, 1993.
- Walesh, S.G. Urban surface water management, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- Wycoff, R.L. & Singh, U.P. Preliminary hydrologic design of small flood detention reservoirs, *Water Resour. Bull.*, 1976, 12, 337-349.