

## METODOLOGIE SPEDITIVE PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DI LAMINAZIONE DEI GRANDI INVASI

F.Miotto<sup>1</sup>, F.Laio<sup>1</sup>, P.Claps<sup>1</sup>

(1) Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino – Torino (IT)  
e-mail: [filippo.miotto@polito.it](mailto:filippo.miotto@polito.it)

Parole chiave: diga, piena, serbatoi artificiali, laminazione piene, indici di rischio.

### SOMMARIO

*L'accumulo temporaneo dei volumi idrici transitanti durante un evento di piena in un invaso artificiale produce una riduzione del valore al colmo dell'idrogramma in uscita rispetto a quello in entrata, configurando il cosiddetto effetto di laminazione della piena. A parità di caratteristiche dell'onda di piena entrante, tale effetto di laminazione risulta fortemente influenzato da fattori di tipo morfologico e idraulico, quali l'area del lago, l'area del bacino e le caratteristiche geometriche degli organi di scarico. Basandosi su tali fattori, diversi Autori hanno proposto indici sintetici per una valutazione speditiva dell'effetto di laminazione. Gli indici presenti in letteratura sono tuttavia spesso costruiti in maniera tale da non permettere una loro applicazione generalizzata, in quanto riferiti a specifiche condizioni idrologico-idrauliche, oppure forniscono risultati puramente qualitativi, non direttamente confrontabili con l'effettivo indice di laminazione.*

*Nella presente memoria si è utilizzata una procedura analitica semplificata di derivazione del coefficiente di laminazione di un invaso, pervenendo alla formulazione di un nuovo indice sintetico, chiamato SFA (Synthetic Flood Attenuation), basato su tre sole grandezze, di immediata valutazione: Area del bacino, Area del lago di invaso, Lunghezza della soglia dello scarico di superficie. L'indice SFA può essere ottenuto per via diretta (senza taratura) e, essendo di derivazione analitica, rappresenta effettivamente un coefficiente di laminazione. Per valutare le capacità descrittive dell'indice sintetico proposto, anche in confronto ad altri indici, si è studiato come la variabilità della forma dell'onda di piena influenza il coefficiente di laminazione, e si sono quindi formulati opportuni criteri di confronto. È stata inoltre esaminata una possibilità di estensione dell'indice con riferimento a sezioni poste a valle dell'invaso, combinando gli effetti del serbatoio e del bacino residuo. Un'applicazione a 16 invasi e 65 sezioni del bacino del Toce ha dimostrato le buone capacità descrittive dell'indice proposto.*

### 1 INTRODUZIONE

In presenza di un invaso artificiale, l'accumulo temporaneo dei volumi idrici transitanti durante un evento di piena, produce una riduzione del valore al colmo dell'idrogramma in uscita rispetto a quello in entrata, configurando il cosiddetto effetto di laminazione della piena. Volendo quantificare il rischio idrologico in un bacino in cui sia presente un invaso, si può procedere tramite metodi di simulazione. Questi considerano onde di progetto corrispondenti a diversi periodi di ritorno, calcolando di volta in volta i valori di picco delle onde uscenti dal serbatoio. In questo caso, la valutazione dell'effetto di laminazione si basa sulla soluzione dell'equazione di continuità dei serbatoi

$$q_e(t) - q_u(t, H) = \frac{dV(t, H)}{dt} \quad (1)$$

che fornisce la variazione di volume  $V$  in un invaso come differenza tra la portata in ingresso  $q_e(t)$  e la portata in uscita  $q_u(t, H)$  dagli organi di scarico, che dipende dal livello idrico  $H$  nel serbatoio. Nota la sollecitazione in ingresso  $q_e(t)$  e la relazione che lega la portata  $q_u(t)$  esitata dagli scarichi al volume invasa-

to, si ricava l'idrogramma uscente  $q_u(t)$ . Il suo valore massimo  $Q_u$ , rapportato al corrispondente valore al colmo della portata in ingresso  $Q_e$ , fornisce il coefficiente di laminazione relativo all'invaso:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_e} \quad (2)$$

Già in presenza di un singolo bacino contenente un singolo vaso, determinare la curva di frequenza delle piene a valle dello stesso risulta un obiettivo che presenta notevoli incertezze. Queste sono essenzialmente legate alla costruzione delle onde di piena di progetto, le quali devono presentare forme riconducibili a quelle osservate. Per la scarsità di dati storici relativi ai volumi di piena, nella determinazione di onde di piena di progetto risulta difficile scegliere uno tra i numerosi metodi proposti nel passato, in quanto spesso legati ad un particolare contesto climatico. Inoltre, come si vedrà in seguito, anche rispettando la curva di riduzione dei colmi di piena si possono proporre forme d'onda che producono risultati molto diversi. Se l'obiettivo è quello di una valutazione su scala regionale del rischio di piena in territori caratterizzati dalla presenza di invasi, si vede bene come le difficoltà divengono quasi insormontabili.

Infatti, la grande varietà di configurazioni idrauliche delle opere di scarico presenti sulle dighe italiane rende assolutamente arduo il compito di identificare procedure standard per una valutazione 'uniforme' dell'effetto di laminazione esercitato dalle capacità di vaso. Non appena ci si discosta dal classico caso di singola soglia libera di sfioro, le varianti possibili diventano subito numerose ed ogni scelta tecnica appare arbitraria o soggettiva. Il tentativo condotto in questo lavoro è quello di codificare i termini del problema in modo da consentire delle valutazioni di massima dell'efficacia di un sistema di dighe nella riduzione del rischio idraulico a valle. In questo senso ci si indirizza ad indici sintetici (o speditivi) di laminazione, sulla scorta di quanto, ad esempio, proposto nel *FEH* (1999).

Esaminando e rielaborando le poche proposte esistenti nella letteratura tecnica, viene sviluppato un nuovo indice sintetico, capace di descrivere l'effetto di laminazione degli invasi grazie alla conoscenza di pochi fondamentali parametri di carattere idrologico ed idraulico. L'elaborazione di questo indice è strettamente legata a considerazioni di carattere idraulico, in base alle quali si dovrebbe determinare in modo non arbitrario la geometria di uno scarico 'caratteristico'. Ciò è necessario in tutti i casi in cui gli scarichi siano intercettati da paratoie.

Analizzando anche come la variabilità della forma dell'onda influenza il coefficiente di laminazione, è possibile stabilire un opportuno criterio di confronto per stabilire la capacità descrittiva dell'indice sintetico proposto, basato sull'analisi dell'efficienza relativa di laminazione in invasi diversi, in funzione di diverse forme di onda. L'ultima fase dell'analisi prevede la proposta di un metodo di stima dell'indice sintetico a valle degli invasi combinando gli effetti dei singoli serbatoi, ottenendo un metodo di stima a macro-scala.

### 1.1 Indici speditivi di laminazione in letteratura.

La definizione di indici di tipo speditivo è effettuata, in letteratura, in base ad ipotesi semplificate sulla forma dell'onda di piena e sulla tipologia delle opere di scarico. Questi indici possono essere distinti in generi di tipo qualitativo o di tipo quantitativo. Gli indici sintetici di tipo qualitativo evidenziano le possibilità di laminazione in un bacino idrografico a causa della presenza di laghi senza distinzione tra invasi naturali ed artificiali, fornendo un valore di confronto tra due o più invasi. Gli indici di tipo quantitativo forniscono il coefficiente  $\eta$  in base a poche grandezze significative, come il volume dell'onda di piena, il volume del serbatoio destinato alla laminazione, il tempo di raggiungimento del picco e la durata dell'onda di piena.

Un indice sintetico di tipo qualitativo è il *Flood Attenuation by Reservoirs and Lakes (FARL)* (Scarrott et al., 1999). Esso è costituito da una relazione intercorrente tra la superficie del lago  $A_L$ , l'area del bacino imbrifero  $A_B$  sotteso dall'invaso e l'area  $A_C$  del bacino sotteso dalla sezione di valle nella quale si vuole valutare l'indice:

$$\alpha = (1 - \sqrt{r})^w \quad (3)$$

in cui  $r = A_L/A_B$  mentre  $w = A_B/A_C$ . In presenza di più invasi, l'indice *FARL* risulta essere il prodotto dei

singoli  $\alpha$  valutati per ogni lago. Il valore ottenuto non è un coefficiente di laminazione e quindi deve essere inteso in senso qualitativo e comparativo. Esso è utilizzato, unitamente ad altri parametri geomorfoclimatici  $X_i$ , in formule per la valutazione della piena indice (Darlymple, 1960) del tipo

$$Q_{indice} = a \cdot FARL^b \cdot \prod X_i^c . \quad (4)$$

Gli indici di tipo quantitativo (per un'ampia rassegna si veda Mays, 1999) sono stati per lo più introdotti per effettuare un pre-dimensionamento dei volumi da destinare alla laminazione, in base ad un coefficiente di laminazione  $\eta$  desiderato. Questi indici si basano sulla scelta di particolari forme per le onde di piena entranti, a volte mantenute per le onde uscenti, e sono vincolati al fatto che il coefficiente  $\eta$  venga ottenuto al raggiungimento del livello di massimo invaso, quando tutto il volume disponibile è stato utilizzato. Solo in alcuni casi (Wycoff & Singh, 1976) si prende in considerazione anche la posizione del picco dell'onda in ingresso.

Un particolare criterio quantitativo è quello proposto da Piga e al. (2000) che realizzano un'analisi multiregressiva sui parametri che influenzano la laminazione. Utilizzando le grandezze  $L[m]$  (larghezza della soglia di sfioro),  $A_L[km^2]$  (area del lago di invaso) ed  $A_B[km^2]$  (area del bacino sotteso), i citati autori hanno ottenuto un coefficiente  $\eta$  sintetico tramite la relazione

$$\eta = 1 - \exp\left[-\left(0.119 \cdot L^{0.225} \cdot A_L^{-0.583} \cdot A_B^{0.405}\right)\right] . \quad (5)$$

La (5) è valida per onde di piena di elevato periodo di ritorno e per bacini con caratteristiche idrologiche simili a quelli considerati nella stima della relazione, che sono localizzati nella regione Sardegnana.

## 2 UN NUOVO INDICE SINTETICO DI LAMINAZIONE

Per valutare le prestazioni degli indici presenti in letteratura si consideri il caso generale in cui l'onda di piena venga smaltita attraverso scarichi di superficie ad efflusso libero, condizioni con la quale sono stati ricavati tutti gli indici citati precedentemente.

Gli indici di tipo qualitativo hanno l'inconveniente di fornire un valore che non è direttamente paragonabile al coefficiente di laminazione. Essi, inoltre, si basano sulla conoscenza di due sole grandezze: area del lago  $A_L$  e area del bacino  $A_B$  e non tengono conto delle dimensioni caratteristiche dello scarico. Questo, a parità di altre condizioni, determina una consistente perdita di informazione.

D'altra parte, gli indici di tipo quantitativo, essendo stati sviluppati per problemi di progetto, determinano un'applicazione piuttosto arbitraria in fase di verifica. I risultati sono ottenuti invertendo le formule originali e considerando  $\eta$  come incognita, invece che come dato del problema. In molti casi è necessario stimare il volume invasato durante l'evento di piena, volume che è a priori incognito e comunque i risultati sono vincolati alla forma delle onde di piena, sia in ingresso che in uscita, utilizzate per la definizione degli indici.

Gli indici derivati da analisi multiregressiva, infine, pur avendo un'elevata capacità descrittiva, hanno l'inconveniente di vincolare l'applicazione a bacini simili a quelli utilizzati per la taratura. Ad esempio, nel caso del bacino del Toce (Miotto et al., 2006) un'analisi simile a quella condotta da Piga e al. (2000) ha portato a buoni riscontri, sia utilizzando le stesse grandezze proposte nella (5), ma esponenti diversi, sia introducendo anche l'esponente  $n$  della curva di possibilità pluviometrica espressa in forma monomia, evidenziando il legame con le caratteristiche climatiche della zona in cui vengono proposti gli indici.

Considerando la necessità di minimizzare l'arbitrarietà delle ipotesi nell'ambito di studi sul rischio di piena, si sono considerate semplici condizioni al contorno di funzionamento del serbatoio, per sviluppare un nuovo indice sintetico a partire da una soluzione semplificata dell'equazione di continuità (1).

Le ipotesi di partenza sono:

- utilizzo, ai fini della laminazione, di un solo scarico di superficie, avente comunque le luci completamente aperte e con funzionamento a stramazzo;
- livello iniziale del lago pari alla quota della soglia dello scarico di superficie considerato;
- serbatoio illimitato superiormente: per semplificare la valutazione si permette il superamento del

livello di massimo invaso durante la laminazione.

Rappresentando la curva dei volumi di invaso la legge  $V = A_L \cdot H^{mI}$ , in cui  $H$  rappresenta il carico idraulico, e la legge di efflusso nella forma  $q_u = c_I \cdot L \cdot H^{rI}$ , in cui  $L$  è la larghezza della soglia di sfioro, tramite sostituzione di  $H$  nella curva dei volumi di invaso, si ricava la relazione

$$V = A_L \cdot \left( \frac{q_u}{c_I \cdot L} \right)^{\frac{mI}{rI}}. \quad (6)$$

considerando l'invaso lineare ( $mI=rI$ ) si ricava  $V = I \cdot q_u$  con

$$I = \frac{A_L}{c_I \cdot L} \quad (7)$$

In ingresso all'invaso si considerano idrogrammi di forma rettangolare, di durata  $D$ , la cui portata

$$Q_D = \varepsilon_D \cdot Q_C \quad (8)$$

è determinata a partire dalla curva di riduzione dei colmi di piena  $\varepsilon_D$  (NERC, 1975; Pianese & Rossi, 1986; Miotto *et al.*, 2004), una volta nota la portata al colmo di piena  $Q_C$ . Sotto queste ipotesi l'equazione (1) è riscritta nella forma

$$Q_D - q_u(t) = I \cdot \frac{dq_u(t)}{dt} \quad (9)$$

Risolta la (9), la portata massima in uscita (ottenuta al tempo  $t = D$ ) vale:

$$Q_{u,D} = Q_D \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{D}{I}\right) \right]. \quad (10)$$

Il coefficiente di laminazione  $\eta$  è ottenuto massimizzando, al variare di  $D$ , la funzione

$$\eta = \frac{Q_C \cdot \varepsilon_D \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{D}{I}\right) \right]}{Q_C} = \varepsilon_D \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{D}{I}\right) \right]. \quad (11)$$

Per il rapporto di riduzione  $\varepsilon_D$  si adotta la forma semplificata

$$\varepsilon_D = \exp\left(-\frac{D}{K}\right) \quad (12)$$

in cui il parametro  $K$ , proporzionale al tempo di ritardo  $t_R$  e ad una funzione esponenziale del tipo  $e^n$  (con  $n$  esponente della curva di possibilità pluviometrica espressa in forma monomia), è tipico del bacino in esame. Questo tipo di espressione, molto simile a quella proposta da *Fiorentino* (1985), è stato scelto per consentire di risolvere analiticamente la (11).

Sostituendo la (12) nella (11) ed imponendo la condizione di massimo al variare della durata  $D$ , si ricava la durata critica

$$D_C = -I \cdot \ln\left(\frac{I}{I+K}\right). \quad (13)$$

Questa, sostituita nella (11), fornisce un'espressione analitica per il coefficiente  $\eta$ , configurando un indice sintetico per la valutazione dell'effetto di laminazione *SFA* (*Synthetic Flood Attenuation*)

$$SFA = \frac{I}{R} \cdot \left( \frac{R}{R+I} \right)^{R+I} \quad (14)$$

Il parametro  $R = \frac{I}{K} \propto \frac{A_L}{c_I \cdot L \cdot t_R \cdot e^n}$  racchiude in sé sia informazioni sulla geometria della diga in esame, sia informazioni sul bacino sotteso. Esso può essere ulteriormente semplificato in base ad alcune osservazioni: innanzitutto si può sostituire al tempo di ritardo  $t_R$  l'espressione  $\sqrt{A_B}$  in base a quanto viene proposto in letteratura (v.es. *Rossi & Villani, 1994*); in secondo luogo si ha che, nel normale campo di variazione di  $c_I$  ed  $n$ , il prodotto tra  $c_I$  ed  $e^n$  varia tra 2 e 4. Sostituendo ad esso, in prima approssimazione, il valore 3, si giunge a definire un indice semplificato di natura semi-teorica, caratterizzato dal parametro

$$R = 100 \cdot \frac{A_L}{L \cdot \sqrt{A_B}} \quad (15)$$

in cui  $A_L$  ed  $A_B$  sono espresse in  $[km^2]$ , mentre  $L$  è espresso in  $[m]$ . Il fattore moltiplicativo 100 tiene conto, oltre che delle semplificazioni indicate, anche di considerazioni di analisi dimensionale necessarie per esprimere correttamente le tre grandezze da cui dipende  $R$ .

### 3 EFFETTI DELLA FORMA DELL'ONDA SUL COEFFICIENTE DI LAMINAZIONE

#### 3.1 Applicazione su un sistema reale.

Prima di intraprendere una procedura di verifica degli indici di laminazione richiamati è necessario precisare ulteriormente i termini del confronto con il coefficiente di laminazione  $\eta$  ottenuto risolvendo l'equazione di continuità (1). Per il calcolo di  $\eta$  si possono usare diverse onde di piena sintetiche, equivalenti come valore al colmo e volume, ma caratterizzate da una differente posizione del picco di piena.

Sarà necessario considerare gli effetti della posizione del picco su  $\eta$  per stabilire la possibilità di istituire un confronto oggettivo tra gli indici sintetici ed una certa categoria di coefficienti  $\eta$ .

L'analisi di sensitività è effettuata su un campione di invasi di cui si conoscono in dettaglio le caratteristiche relative allo sbarramento, al lago ed al bacino sotteso (Tabella 1). Degli invasi indicati in tabella, 16 appartengono al bacino del fiume Toce, mentre 4 sono stati scelti tra quelli ricadenti nella regione Basilicata e sono stati inseriti in quanto presentano caratteristiche idrologiche differenti dai primi. Essi, infatti, sottendono bacini con estensione maggiore e presentano un esponente  $n$  della curva di possibilità pluviometrica inferiore a quelli relativi agli invasi del Toce. Le caratteristiche fisiche ed idrologiche dei bacini sottesi dagli invasi considerati, sono desumibili da *Claps et al. (2005)* per il Toce, mentre per gli invasi lucani si è utilizzata la banca dati messa a disposizione nell'ambito del La.T.I.B.I..

Per la determinazione dell'idrogramma sintetico in ingresso si può fare riferimento alla curva di riduzione dei colmi di piena (*NERC, 1975; Pianese & Rossi, 1986*) espressa, ad esempio, da:

$$\varepsilon_D = (I + b \cdot D)^{-c} \quad (16.A)$$

che considera il rapporto di riduzione funzione del parametro  $b=0.5/t_R$  e del parametro  $c=1-n$ , dove i simboli hanno il significato già descritto in precedenza.

L'idrogramma in entrata viene definito a partire dalla curva di riduzione dei colmi di piena, sfruttando la procedura proposta da *Fiorentino (1985)* che ipotizza l'idrogramma in ingresso caratterizzato da una risalita istantanea al tempo  $t=0$  e da un andamento decrescente per tempi  $t>0$ , ottenendo:

$$Q_D = \left( \frac{I}{D} \int_0^D q_e(\tau) d\tau \right) = Q_C \cdot \varepsilon_D \quad (16.B)$$

L'equazione assunta dall'idrogramma è ottenibile invertendo la (16.B), dopo aver sostituito all'intervallo  $D$  il generico tempo  $t$ , ossia, posta in sostituzione della (16.B) l'espressione

$$\frac{1}{t} \int_0^t q(t) dt = Q_C \cdot \varepsilon_D \quad (16.C)$$

e, ricavando  $q_e(t)$  (che rappresenta l'idrogramma cercato) derivando la (16.D), si ottiene

$$q_e(t) = \frac{d}{dt} (t \cdot Q_C \cdot \varepsilon_D). \quad (16.D)$$

L'idrogramma in entrata è quindi identificato tramite l'espressione

$$q_e(t) = Q_C \cdot \varepsilon_D + t \cdot Q_C \cdot \varepsilon'_D \quad (16.E)$$

in cui  $\varepsilon'_D$  rappresenta la derivata rispetto al tempo della curva di riduzione dei colmi di piena.

	INVASO	Area Bacino $A_B$ [km <sup>2</sup> ]	Tempo ritardo $t_R$ [ore]	Esponente C.P.P. $n$ [ - ]	Portata media $Q_m$ [m <sup>3</sup> /s]	Area Lago $A_L$ [km <sup>2</sup> ]	Lunghezza Soglia $L$ [m]
Bacino del Fiume Toce	Agaro	10.60	0.556	0.51	19.55	0.650	36.00
	Agrasina	17.83	1.128	0.50	31.66	0.0135	12.30
	Alpe Cavalli	23.74	1.253	0.56	29.03	0.467	18.00
	Alpe Larecchio	3.02	0.464	0.50	6.90	0.183	25.00
	Busin Inferiore	2.54	0.357	0.46	6.13	0.336	10.00
	Campliccioli	35.19	1.401	0.56	38.40	0.324	13.50
	Camposecco	4.08	0.497	0.56	7.28	0.383	105.85
	Ceppo Morelli	121.00	2.099	0.56	97.248	0.040	84.00
	Devero	25.38	0.866	0.51	36.40	0.96	25.50
	Lago Avino	5.32	0.497	0.54	9.04	0.43	45.25
	Lago Cingino	3.06	0.431	0.56	5.78	0.14	65.00
	Morasco	35.26	1.305	0.46	42.59	0.65	45.00
	Quarazza	25.81	1.002	0.55	35.26	0.028	31.20
	Sabbione	14.37	0.818	0.46	22.93	1.21	10.00
	Val Toggia	10.32	0.720	0.44	17.71	0.81	28.00
Vannino	11.94	0.727	0.47	20.75	0.48	22.80	
Basilicata	Acerenza	156.49	2.708	0.31	58.10	2.00	56.55
	Basentello	300.11	3.477	0.28	108.00	3.50	71.00
	Camasta	339.84	3.647	0.38	84.81	2.00	46.80
	Genzano	36.49	1.548	0.28	22.87	2.60	76.97

**Tabella 1.** Caratteristiche principali degli invasi utilizzati per generare il campione utilizzato nei confronti.

Utilizzando come criterio di distinzione la posizione del picco, si possono ottenere tre espressioni analitiche differenti per l'onda di piena:

- picco all'istante iniziale e solo ramo decrescente

$$q_e(t) = Q_C \cdot \left[ (l + b \cdot t)^{-c} - c \cdot b \cdot t \cdot (l + b \cdot t)^{-(c+l)} \right]; \quad (17.A)$$

- picco in posizione centrale e due rami simmetrici

$$q_e(t) = Q_C \cdot \left[ (I + 2b \cdot |t - t_p|)^{-c} - 2b \cdot c \cdot |t - t_p| \cdot (I + 2b \cdot |t - t_p|)^{-c-1} \right]; \quad (17.B)$$

- picco all'istante finale e solo ramo crescente

$$q_{eC}(t) = Q_C \cdot \left[ (I + b \cdot |t - D_{max}|)^{-c} - c \cdot b \cdot |t - D_{max}| \cdot (I + b \cdot |t - D_{max}|)^{-(c+1)} \right] \quad (17.C)$$

Nelle (17.A-C)  $D_{max}$  rappresenta la durata complessiva dell'evento, mentre  $t_p$  indica l'istante in cui si ha il picco. Noto il volume dell'onda di piena ( $V_p = Q_C D_{max} \varepsilon_{D_{max}}$ ), si sollecita il sistema anche con idrogrammi di forma triangolare, caratterizzati da un valore al colmo pari sempre a  $Q_C$ , un volume complessivo dell'onda pari a  $V_p$ , e posizione del picco variabile, analogamente a quanto proposto in precedenza.

Utilizzando queste sei forme d'onda, si è calcolato il coefficiente di laminazione effettivo  $\eta$  tramite integrazione della (1), con le ipotesi già menzionate riguardo alle opere di scarico ed al superamento del massimo invaso.

L'analisi effettuata sugli invasi di tabella 1 mostra che i valori minimi e massimi ottenuti per il coefficiente di laminazione evidenziano una notevole sensibilità alla forma dell'onda di piena (tabella 2). Ciò conferma la difficoltà di stabilire un termine di confronto univoco rispetto al quale si possa valutare l'efficienza degli indici sintetici. D'altra parte, i valori di  $\eta$  calcolati con i 6 idrogrammi sintetici sembrano porsi in un ordine di merito che varia molto poco da una forma all'altra. Se si ordinano gli invasi in base al coefficiente di laminazione ottenuto, si ottiene infatti una classifica che rimane quasi invariata nei 6 casi (tabella 2, ultime due colonne). La posizione d'ordine (o *rank*) può pertanto essere utilizzata come riferimento per giudicare le prestazioni degli indici sintetici.

Per meglio indagare sia la variabilità di  $\eta$  che la stabilità dei *ranghi*, si è costruito un sistema più ampio di invasi e bacini di riferimento estendendo artificiosamente il campione a disposizione.

INVASO	Coefficiente di laminazione $\eta$		Posizione d'ordine	
	minimo	massimo	minima	massima
Agaro	0.228	0.684	8	9
Agrasina	0.883	0.995	19	19
Alpe Cavalli	0.367	0.795	12	13
Alpe Larecchio	0.259	0.770	11	11
Busin Inferiore	0.100	0.247	2	3
Campliccioli	0.434	0.882	15	17
Camposecco	0.419	0.927	15	16
Ceppo Morelli	0.943	0.997	20	20
Devero	0.238	0.610	8	9
Lago Avino	0.246	0.715	10	10
Lago Cingino	0.443	0.943	16	17
Morasco	0.395	0.849	14	14
Quarazza	0.843	0.993	18	18
Sabbione	0.101	0.157	2	3
Val Toggia	0.161	0.414	4	7
Vannino	0.288	0.797	12	13
Acerenza	0.178	0.313	4	6
Basentello	0.185	0.306	4	6
Calastra	0.209	0.311	5	7
Genzano	0.082	0.127	1	1

**Tabella 2.** Valutazione dei valori massimo e minimo del coefficiente di laminazione  $\eta$  e della posizione d'ordine al variare della forma dell'onda di piena sollecitante.

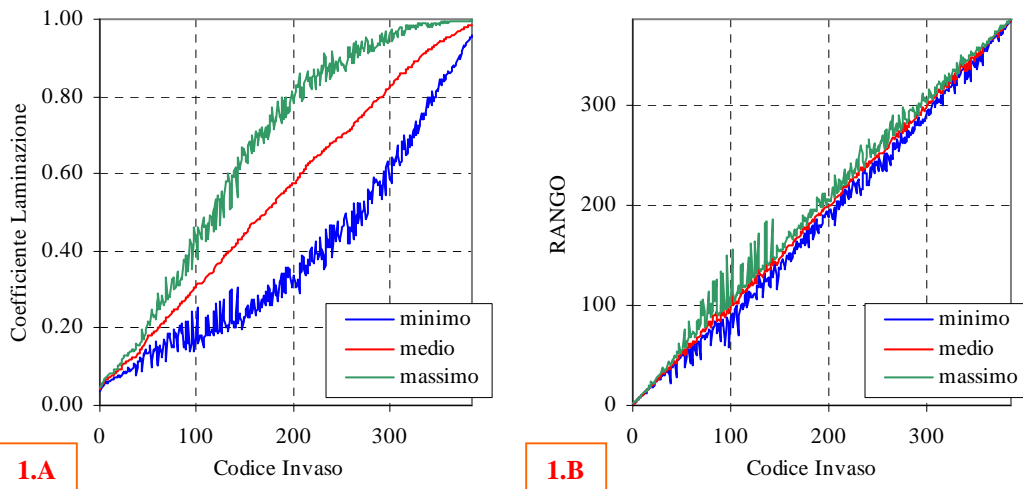
### 3.2 Applicazione su un sistema esteso di invasi e bacini.

Ognuna delle configurazioni invaso-bacino idrografico esaminate (tabella 1) può essere codificata in due categorie di informazioni essenziali. La prima, di tipo idrologico e denominata nel seguito *BACINO*, ne raccoglie le relative informazioni: area del bacino  $A_B$ , tempo di ritardo  $t_R$ , esponente  $n$  della curva di possibilità pluviometrica, portata al colmo di piena  $Q_C$ , posta pari alla piena media. La seconda, denominata *INVASO* raccoglie informazioni quali: caratteristiche dello scarico, curva dei volumi di invaso, area del lago  $A_L$ . Associando ad ogni *BACINO* le caratteristiche di ogni altro *INVASO*, si sono generate 400 coppie *BACINO-INVASO* che, sotto la condizione  $A_B/A_L > 2$  (il lago deve avere estensione minore del bacino), permette di costruire un sistema di 385 configurazioni di invasi.

Su questo sistema è stata nuovamente applicata la procedura descritta al paragrafo precedente, utilizzando le sei forme d'onda già descritte. Ad ogni configurazione tra quelle ottenute è stato attribuito un codice, calcolando i sei valori di  $\eta$  tramite l'equazione di continuità. Per capire come la diversa forma dell'idrogramma, a parità di valore al picco e di volume sotteso, possa influenzare l'effetto di laminazione, si procede in 4 fasi successive:

- 1) scelta di un idrogramma di tipo sintetico (forma) tra i sei riportati al paragrafo precedente;
- 2) calcolo di  $\eta$  per ogni coppia *BACINO-INVASO* risolvendo l'equazione di continuità;
- 3) ad ogni invaso è attribuito un numero, nel seguito chiamato *rango*, che ne identifica la posizione occupata nel vettore che ordina in senso crescente i coefficienti di laminazione determinati per ogni coppia e con l'onda in ingresso assegnata al punto 1);
- 4) si ripete per ogni forma d'onda la procedura esposta ai punti 1)-3).

Per ogni configurazione si associano al codice invaso i valori massimo, minimo e medio sia di  $\eta$ , che della posizione d'ordine ottenuta per ogni forma d'onda nell'ambito del sistema di invasi (figure 1.A e 1.B). Per facilitare l'interpretazione dei risultati i codici sono stati attribuiti tenendo conto dei ranghi assunti dai diversi invasi, facendoli coincidere con il valore medio conseguito nelle sei prove.



**Figura 1.** Coefficienti di laminazione  $\eta$  (1.A) e ranghi (1.B) ottenuti per il sistema esteso di invasi. Per ogni codice invaso sono rappresentati i valori massimo, medio e minimo.

Dai grafici di figura 1 si può notare che il coefficiente  $\eta$  risulta essere molto sensibile al tipo di onda entrante (figura 1.A), risultando minimo per picco in posizione  $t=0$  e massimo quando il picco diviene a fine evento. Al contrario, la stessa analisi basata sui ranghi (figura 1.B), mostra che la scelta di diverse forme per le onde di piena non modifica di tanto i rapporti relativi tra gli  $\eta$  dei diversi invasi. Si consideri, ad esempio l'invaso di codice 200: per esso si è ottenuto che il coefficiente  $\eta$  varia tra circa 0.30 a circa 0.80, mentre il rango ha una variazione di alcune unità intorno al valore medio. Si può quindi concludere che la scelta di forme d'onda differenti, con un solo picco, modifica il coefficiente di laminazione solo per

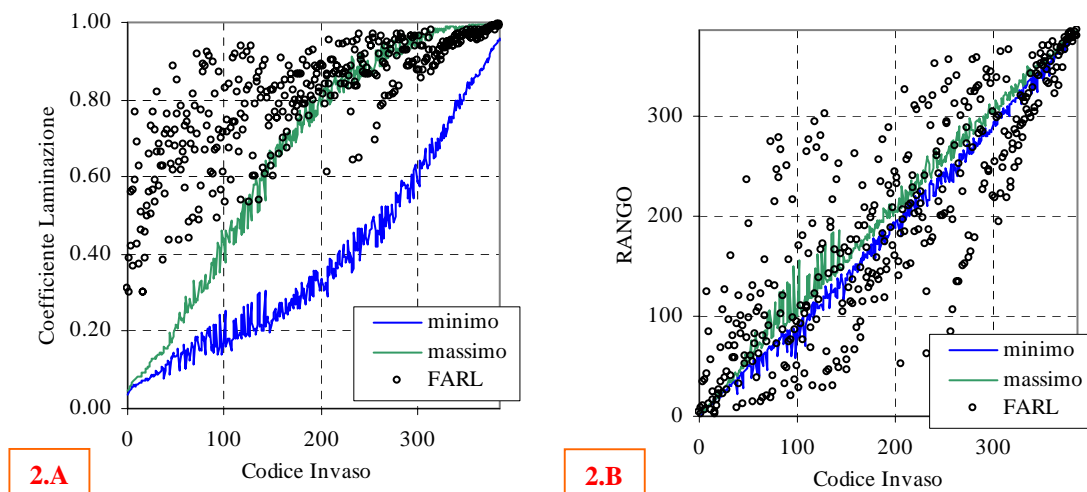


un fattore di scala. Se ciò non fosse vero, dovrebbero cambiare sensibilmente anche i rapporti specifici tra gli invasi, determinando una variazione più cospicua anche in termini di rango.

#### 4 VALIDAZIONE DEGLI INDICI SINTETICI DI LAMINAZIONE.

Le considerazioni fatte sulla variabilità dei coefficienti di laminazione in funzione della forma d'onda consentono di impostare in termini relativamente oggettivi una procedura di validazione degli indici sintetici descritti nei paragrafi 1 e 2. Tale procedura prevede che gli indici sintetici vengano posizionati nel diagramma di figura 1.A e che tutti vengano comunque esaminati anche in relazione al loro rango per il sistema esteso di invasi definito in precedenza. Independentemente dai valori, necessariamente arbitrari, stimati per  $\eta$ , il rispetto del rango medio rappresenta infatti, per un indice sintetico, una significativa descrizione seppur in termini relativi, dell'effetto di laminazione.

Per i 385 invasi ricostruiti tali valutazioni sono state fatte per gli indici *SFA* e *FARL*, che utilizzano all'incirca le stesse informazioni di base. A conferma della non idoneità del *FARL* nel descrivere il coefficiente di laminazione  $\eta$  si mostra il confronto in figura 2.A. Anche la determinazione del rango degli indici *FARL* non risulta particolarmente positiva. La forte dispersione dei valori ottenuti non permette un confronto attendibile tra diversi invasi. L'indice *SFA* che contiene come ulteriore parametro la lunghezza *L* della soglia di sfioro, ha capacità descrittive decisamente migliori, sia nei confronti dei valori effettivi del coefficiente  $\eta$  (figura 3.A) che nei confronti dei ranghi (figura 3.B).



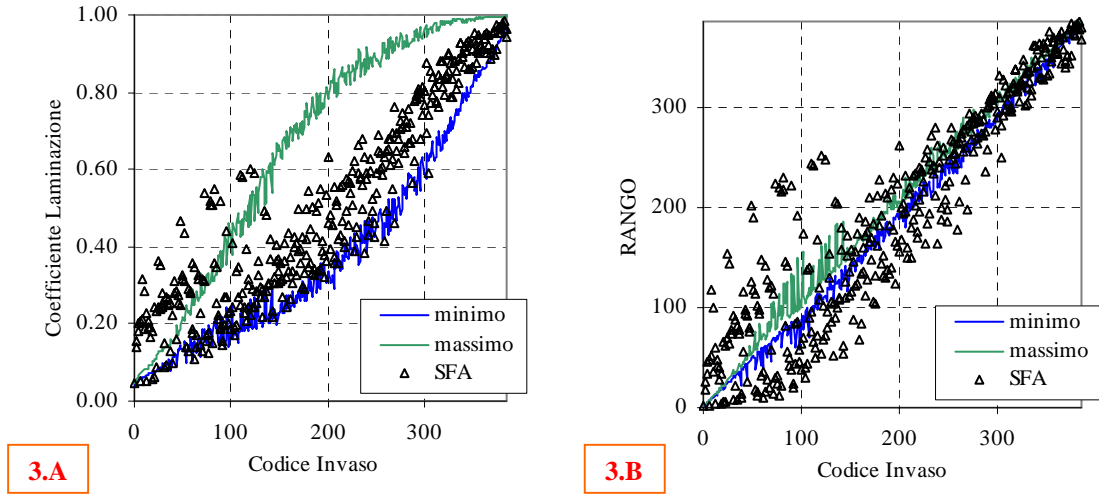
**Figura 2.** Indice *FARL* stimato sugli invasi del sistema esteso: confronto con gli  $\eta$  effettivi (2.A) e tra i ranghi (2.B).

Esaminando comparativamente le figure 3.A e 3.B si può notare come i maggiori scostamenti, sia rispetto a  $\eta$  che rispetto ai ranghi, si verificano per gli invasi che presentano forti variazioni sul rango relativo al coefficiente  $\eta$  (posizione compresa tra 30 e 150). Si evidenzia inoltre una certa difficoltà per l'indice *SFA* ad assumere valori molto bassi.

Non essendovi un unico termine di riferimento, è possibile quantificare numericamente la robustezza degli indici incrociandone i valori con i dati relativi alle sei onde prese in esame. Si può confrontare il grado di scostamento tra questi valori ed i coefficienti di laminazione  $\eta$  ottenuti nei sei casi, tramite lo scostamento medio calcolato tra gli stessi  $\eta$ . Tale scostamento può essere quantificato con il Root Mean Square Error *RMSE* (scostamento medio quadratico).

Dalla tabella 3 si rileva che i valori del *RMSE* ottenuti per l'indice *SFA* sono mediamente inferiori a quelli ottenuti confrontando tra loro i coefficienti  $\eta$ , mostrando una significativa robustezza dell'indice

sintetico. Nel caso dei ranghi (tabella 4), i valori di *RMSE* ottenuti per l'indice *SFA* non presentano variazioni di rilievo al cambiare del tipo di onda, essendo oltretutto nettamente inferiori ai corrispondenti valori calcolati con il *FARL*.



**Figura 3.** Indice *SFA* stimato sugli invasi del sistema esteso: confronto con gli  $\eta$  effettivi (3.A) e tra i ranghi (3.B).

RMSE		Idrogr. NERC			Idrogr. Triangolare			FARL	SFA
		<i>Decresc.</i> <i>(eq. 17.A)</i>	<i>Simmetr.</i> <i>(eq. 17.B)</i>	<i>Cresc.</i> <i>(eq. 17.C)</i>	<i>Decresc.</i>	<i>Simmetr.</i>	<i>Cresc.</i>		
Idrogr. NERC	<i>Decr. (eq. 17.A)</i>	0.000	0.125	0.171	0.190	0.270	0.322	0.451	0.141
	<i>Simm. (eq. 17.B)</i>		0.000	0.051	0.075	0.149	0.203	0.364	0.099
	<i>Cresc. (eq. 17.C)</i>			0.000	0.042	0.105	0.155	0.321	0.114
Idrogr. Triang.	<i>Decr.</i>				0.000	0.082	0.136	0.318	0.127
	<i>Simm.</i>					0.000	0.058	0.280	0.192
	<i>Cresc.</i>						0.000	0.253	0.239
FARL								0.000	0.350
SFA									0.000

**Tabella 3.** Valutazione del *RMSE* sul coefficiente  $\eta$ . Si ipotizza una serie come se fosse costituita da valori stimati e si calcola il *RMSE* nei confronti delle altre serie.

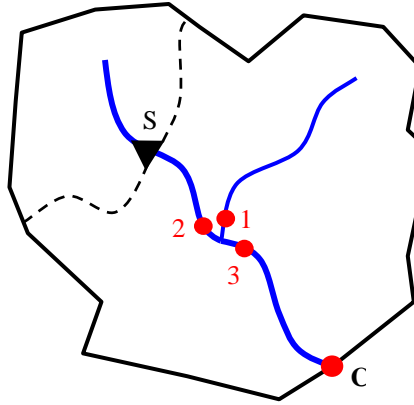
RMSE		FARL	SFA
Idrogr. NERC	<i>Decr. (eq. 17.A)</i>	54	40
	<i>Simm. (eq. 17.B)</i>	58	42
	<i>Cresc. (eq. 17.C)</i>	57	43
Idrogr. Triang.	<i>Decr.</i>	67	45
	<i>Simm.</i>	67	45
	<i>Cresc.</i>	68	45

**Tabella 4.** Valutazione del *RMSE* sui ranghi, ottenuto confrontando i due indici sintetici con i valori ottenuti per le sei onde di piena esaminate.

## 5 INDICI DI LAMINAZIONE PER BACINI CONTENENTI SERBATOI

Per poter stabilire l'impatto di un invaso sul corso d'acqua a valle è necessario tener conto dell'entità degli apporti dal bacino residuo, cioè dalle aree a monte della sezione di interesse, ma poste a valle dell'invaso.

In questo senso, l'onda di piena in arrivo in una generica sezione fluviale può essere vista come somma delle onde generate in sezioni fluviali poste più a monte, opportunamente traslate (Marzolo, 1933; Di Natale *et al.*, 2001). Si consideri un generico bacino (figura 4) al cui interno sia presente un serbatoio S che sottende l'area  $A_B$ . Secondo quanto suggerito da Di Natale *et al.* (2001), l'idrogramma alla sezione C di chiusura  $q_{C,lam}(t)$  tenendo conto della laminazione operata dall'invaso, è ottenuto sottraendo all'idrogramma originario  $q_C(t)$ , valutato senza considerare la presenza dell'invaso, l'idrogramma in entrata al serbatoio  $q_{e,inv}(t-\delta)$  ed aggiungendo l'idrogramma in uscita  $q_{u,inv}(t-\delta)$ . Questi ultimi sono calcolati tenendo presente che gli effetti che si percepiscono nella sezione di chiusura al tempo  $t$  in realtà sono dovuti alle onde che sono transitate nell'invaso ad un tempo  $t-\delta$ , in cui  $\delta$  indica il tempo necessario affinché l'onda di piena raggiunga la sezione di chiusura in esame. Questo approccio non considera l'effetto di laminazione eventualmente insito nel fenomeno di propagazione della piena.



**Figura 4.** Sezioni di chiusura caratteristiche individuate in un bacino idrografico in cui si valuta l'effetto di un serbatoio sulle onde di piena.

La procedura indicata viene semplificata (Marzolo, 1933) sommando, invece che le onde, direttamente i valori al colmo. In questo caso il coefficiente di laminazione  $\eta_C$  per effetto dell'invaso, valutato nella sezione C, è dato dal rapporto

$$\eta_C = \frac{Q_C - Q_{e,S} + Q_{u,S}}{Q_C} \quad (18)$$

in cui il numeratore rappresenta il valore al colmo della portata laminata  $Q_{C,lam}$  calcolato in C.

Si può procedere allo stesso modo nel caso in cui a monte di C siano presenti più serbatoi. In questo caso al numeratore compare la sommatoria di tutte le portate al colmo in ingresso ai singoli invasi  $Q_{e,inv}$  oltre alla sommatoria di tutte le onde in uscita dagli invasi stessi in seguito alla laminazione  $Q_{u,inv}$ :

$$\eta_C = \frac{Q_C - \sum Q_{e,inv} + \sum Q_{u,inv}}{Q_C} \quad (19)$$

Per mantenere anche in questo caso la natura speditiva dell'indice, il calcolo per l'attenuazione e la combinazione a valle prende in considerazione solo le aree sottese e non i valori al colmo dell'onda di piena. Sfruttando la proporzionalità tra portata al colmo ed area del bacino di riferimento, l'indice  $\eta_C$  a valle di un serbatoio (caratterizzato da un indice di valore  $\eta_S$ ) è valutato tramite la relazione

$$\eta_C = \eta_S \cdot \frac{A_B}{A_C} + \frac{A_C - A_B}{A_C}, \quad (20)$$

che si ricava, con le opportune sostituzioni, dalla (18).

La (20) può assumere carattere più generale, permettendo la valutazione del valore dell'indice alla confluenza di due o più aste fluviali come sommatoria delle singole aree  $A_i$  pesate con il rispettivo indice  $\eta_i$ , rapportate sempre all'area complessiva:

$$\eta_{tot} = \sum_i \frac{\eta_i \cdot A_i}{A_C} \quad (21)$$

in cui  $A_C$  è data dalla somma delle singole sotto-aree  $A_i$ , mentre, nel caso in cui sulla singola asta non insistano altri serbatoi, si pone  $\eta_i=1$ . Ad esempio, per il caso riportato in figura 4, nella sezione 2 l'indice vale

$$\eta_2 = \eta_S \cdot \frac{A_B}{A_2} + \frac{A_2 - A_B}{A_2}, \quad (22)$$

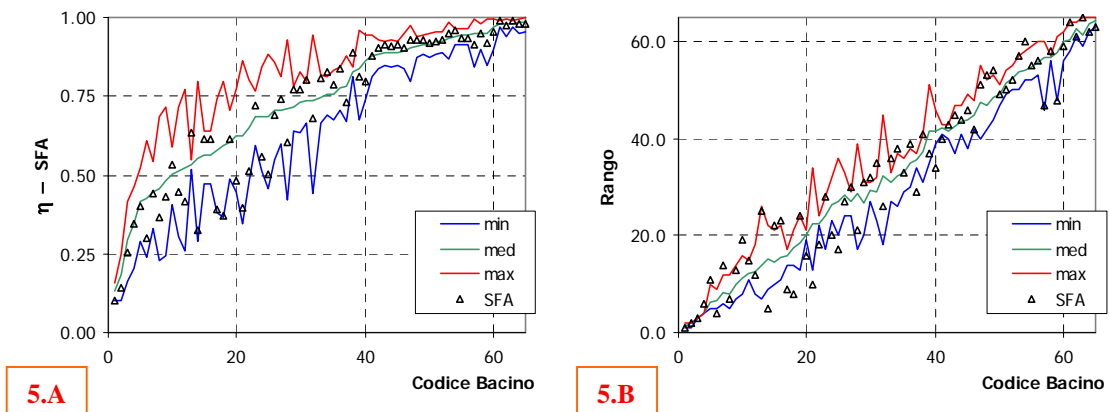
mentre alla sezione 3, successiva all'inserimento di un sottobacino di notevole dimensione, vale

$$\eta_3 = \eta_2 \cdot \frac{A_2}{A_3} + \frac{A_1}{A_3}, \quad (23)$$

nel rispetto della (21). Procedendo in questo modo è possibile analizzare velocemente anche ampi bacini.

### 5.1 Applicazione al bacino del Toce.

La metodologia speditiva proposta è stata applicata a diverse sezioni fluviali poste nel bacino del Toce, in cui sono presenti i primi 16 invasi elencati in tabella 1. Il bacino principale, ottenuto con la sezione di chiusura in corrispondenza del Lago Maggiore, è stato suddiviso in 65 sottobacini. Per la valutazione delle capacità descrittive degli indici sintetici si è proceduto in analogia a quanto fatto per il sistema esteso di invasi trattato precedentemente. Per ogni invaso e per ogni sezione di chiusura il valore al colmo dell'onda di piena è stato assunto pari alla piena media (Claps *et al.*, 2005). In corrispondenza delle 65 sezioni di chiusura individuate a valle degli invasi, si sono valutati, tramite la (19) i coefficienti  $\eta$  per le sei forme d'onda e, tramite la (21), l'indice sintetico *SFA*.



**Figura 5.** Confronto tra i valori rilevati per i 65 bacini esaminati con l'indice *SFA* in termini di  $\eta$  (5.A) e di *rango* (5.B) con gli intervalli di variazione individuati in base alle sei forme d'onda esaminate.

Noti questi valori, si è effettuato il confronto analogamente a quanto fatto nel paragrafo 4, ottenendo i

risultati rappresentati in figura 5.

I risultati ottenuti sono soddisfacenti, in quanto i valori previsti dal *SFA* rientrano nel range di variazione previsto per il coefficiente di laminazione, seguendo l'andamento medio. Anche in termini di rango l'indice *SFA* rispecchia i risultati ottenuti con i coefficienti reali. Sono state individuate solo alcune situazioni anomale, in cui l'indice *SFA* fornisce un valore del rango notevolmente al di fuori del range previsto. Anche in questi casi, comunque, il valore di *SFA* è ancora all'interno dei limiti previsti (figura 5.A).

## CONCLUSIONI

La valutazione a scala regionale del rischio di piena è di norma effettuata trascurando l'effetto di attenuazione che può essere determinato dalla presenza degli invasi artificiali. La valutazione di tale effetto risulta notevolmente complessa, principalmente in quanto la sua entità, descritta dal coefficiente  $\eta$ , dipende molto dalle caratteristiche dell'onda di piena in arrivo ai serbatoi. Anche a parità di portata massima al picco e considerando uguali volumi transitanti in periodi di durata variabile (curva di riduzione dei colmi di piena) l'attenuazione determinata dalla presenza dell'invaso artificiale può variare in modo consistente per diverse forme dell'onda. Altro fattore di grande incertezza è rappresentato dalla possibile presenza di più di un picco nello stesso idrogramma.

Considerando quanto sopra, è stata fatta una valutazione della possibilità di stabilire in modo 'sintetico', cioè univoco, l'effetto di laminazione di invasi singoli o multipli, posti a monte di una sezione fluviale di interesse. Utilizzando una procedura analitica semplificata di derivazione del coefficiente di laminazione di un vaso, è stato introdotto un nuovo l'indice, *SFA* (Synthetic Flood Attenuation), basato su tre sole grandezze, di immediata valutazione: *Area del bacino*, *Area del lago di vaso*, *Lunghezza della soglia dello scarico di superficie*. Questo indice può essere ottenuto per via diretta (senza taratura) e, essendo di derivazione analitica, rappresenta effettivamente un coefficiente di laminazione, compreso tra 0 e 1.

A causa della variabilità di  $\eta$  con la forma dell'onda di piena è possibile solo una verifica qualitativa delle capacità descrittive dell'indice proposto. È stato tuttavia riscontrato che diverse configurazioni di vaso mantengono prestazioni relative sostanzialmente indipendenti dalla forma dell'onda. Tale *efficienza relativa della laminazione*, rappresentata attraverso il rango del valore di  $\eta$ , ha consentito di controllare più efficacemente la robustezza del risultato ottenuto con l'indice sintetico rispetto al coefficiente di laminazione effettivo.

Anche con riferimento a sezioni poste a distanza dall'invaso è stata proposta una estensione dell'indice basata essenzialmente sul rapporto tra le aree. Confrontando questi valori in 65 sezioni del bacino del Toce con quelli ottenuti applicando una metodologia più raffinata si rilevano ancora buone capacità descrittive dell'indice proposto.

Pur rappresentando ancora una proposta introduttiva, l'indice sintetico *SFA* mostra capacità descrittive superiori a quelle del *FARL*, già utilizzato nell'ambito della valutazione delle piene in Gran Bretagna, e presenta ulteriori potenzialità in relazione alla possibilità di utilizzare informazioni fisico-climatiche di non difficile determinazione, quali l'esponente della legge di possibilità pluviometrica ed il tempo di ritardo del bacino.

**Ringraziamenti.** Lavoro finanziato con fondi ARPA Piemonte, Progetto Interreg IIIA.

## BIBLIOGRAFIA

- P. Claps, F. Laio, F. Miotto, A. Petaccia, "Sviluppo di un sistema di gestione dei rischi idrogeologici nell'area del Lago Maggiore, Cap.7.3: Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene – Metodologia e risultati per il Bacino del Toce", Progetto Interreg IIIA Italia-Svizzera, Torino, Ottobre 2005.
- T. Darlymple, "Flood-frequency analyses", U.S. Geological Survey Water Supply Pap., 1543A, 1960.
- M. Di Natale, U. M. Golia, R. Greco, "Sul dimensionamento di massima di un sistema di vasche di laminazione per il controllo delle piene in una rete di drenaggio", in: V. Fioretto, E. Caroni, (a cura di), La difesa idraulica del

- territorio, Università di Trieste, 2001.
- M. Fiorentino, “*La valutazione dei volumi di piena nelle reti di drenaggio urbano*”, *Idrotecnica*, n.3, pp. 141-152, 1985.
- AA.VV., *Flood Estimation Handbook: procedures for flood frequency estimation*, 5 vol., Wallingford: Institute of hydrology, c1999.
- La.T.I.B.I., Laboratorio di Tecnologie Informative per la Pianificazione dei Bacini Idrografici, <http://www.latibi.unibas.it/prodotti/dati/06coll01/default.htm>.
- L. W. Mays, “*Hydraulic design handbook*”, McGraw-Hill, New York, 1999.
- F. Marzolo, “*I serbatoi di piena*”, *L'Energia Elettrica*, pp. 269-284, aprile 1933.
- F. Miotto, F. Laio, P. Claps, “*Sulla valutazione indiretta delle curve di riduzione dei colmi di piena*”, *Atti del XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Trento, 7-10 settembre 2004, vol.2, pag. 471-479, BIOS (Cosenza), 2004.
- F. Miotto, P. Claps, F. Laio, “*Determinazione di un indice sintetico per la valutazione dell'effetto di laminazione*”, Working-Paper 2004-06, Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino, [http://www2.polito.it/strutture/ditic/Ricerca/Working\\_papers.htm](http://www2.polito.it/strutture/ditic/Ricerca/Working_papers.htm).
- Natural Environmental Research Council, “*Estimation of flood volumes over different duration*”, *Flood Studies Report*, vol. I, pp.352-373, London, 1975.
- D. Pianese, F. Rossi, “*Curve di possibilità di laminazione delle piene*”, *Giornale del Genio Civile*, 4, 5, 6, pp.131-148, 1986.
- E. Piga, A. Saba, F. Salis, G. M. Sechi, “*Distribuzione probabilistica delle portate massime annue laminate da un invaso con sfioratore superficiale*”, in: XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, vol.3, pp.85-92, Genova, 12-15 settembre 2000.
- F. Rossi, P. Villani, (a cura di) “*Valutazione delle piene in Campania*”, Rapporto Regionale Campania, CNR-GNDICI, 1994.
- R.M.J. Scarrott, D.W. Reed, A.C. Bayliss, “*Indexing the attenuation effect attributable to reservoirs and lakes*”, in: Robson, A. & Reed, D., “*Statistical procedures for flood frequency estimation*”, *Flood Estimation Handbook*, vol.5, pg. 19-26.
- R.L. Wycoff, U.P. Singh, “*Preliminary hydrologic design of small flood detention reservoirs*”, *Water Resources Bulletin*, pp.337-349, vol. 12, no. 2, april 1976.