



METODI SPEDITIVI PER IL DIMENSIONAMENTO DI SISTEMI DI VASCHE DI LAMINAZIONE A SCALA DI BACINO

**GIUSEPPE DEL GIUDICE,
GIACOMO RASULO,
DANIELE SICILIANO**

Dipartimento di Ingegneria
Civile, Edile ed Ambientale
(DICEA) - Università di Napoli
Federico II

Introduzione

Lo sviluppo urbanistico delle aree di pianura rende spesso difficile realizzare opere di difesa di tipo passivo delle aree soggette a rischio, a causa della impossibilità di posizionare all'interno dei nuclei edificati manufatti come gli argini; pertanto si moltiplicano i casi in cui si ricorre a difese di tipo attivo quali le vasche di laminazione.

Nei bacini in cui le aree a rischio sono diffuse sul territorio risulta conveniente realizzare più vasche distribuite sul territorio, integrate in un sistema complesso, in grado di gestire le portate di piena a scala di bacino.

In linea generale, per analizzare l'effetto di un sistema di vasche di laminazione sul controllo delle portate di piena in una qualsiasi sezione del reticolo idrografico, occorrerebbe depurare l'idrogramma di piena che si avrebbe nella particolare sezione, in assenza delle vasche di monte (idrogramma indisturbato), del contributo dei singoli sottobacini sottesi dalle vasche ubicate a monte (idrogrammi indisturbati), ed aggiungere il contributo che questi danno, invece, a seguito della presenza delle vasche (idrogrammi laminati).

In linea pratica si potrà ricorrere a metodi numerici di simulazione solo se il modello prescelto, per schematizzare la formazione della portata di piena in una qualsiasi generica sezione, consente di individuare, nell'idrogramma di piena di questa, il contributo di ogni singola parte del bacino sotteso. Pertanto nel seguito si farà riferimento, per schematizzare la formazione delle piene su di un bacino, al modello cinematico. In questo caso sarà agevole effettuare i sopradescritti bilanci di massa per cui, accoppiando a questo modello le equazioni che descrivono il funzionamento delle vasche di laminazione, sarà possibile simulare l'effetto di una o più vasche in qualsiasi sezione d'interesse.

Se quanto sopra proposto consente di simulare il funzionamento di un determinato sistema di vasche, ci si è posti il quesito se, introducendo alcune semplificazioni, non fosse possibile avere immediatamente, in base a posizione e volume della vasca, indicazioni attendibili, anche se non esaustive, dell'efficienza di una o più vasche in una qualsiasi sezione valliva del corso d'acqua. In questo modo il progettista avrebbe uno strumento molto utile, nella fase preliminare di individuazione della ubicazione e della dimensione delle vasche, mentre gli algoritmi di integrazione numerica di maggiore dettaglio sarebbero rinviati alla fase finale di verifica.

Nel presente lavoro si propone un semplice approccio, basato sulla teoria dei sistemi lineari, che consente di pervenire ad una semplice equazione analitica, che descrive l'efficienza di una vasca o di un sistema complesso di queste, in una qualsiasi sezione valliva del corso d'acqua.



Il modello cinematico della corrivazione

Il modello cinematico o della corrivazione, oltre alla prerogativa di essere largamente utilizzato, funzionale e concettualmente semplice, ha il vantaggio di consentire d'individuare, nell'idrogramma di piena, il contributo di ogni singola parte del bacino. Il modello si basa infatti sulle seguenti ipotesi:

- la formazione della piena è dovuta esclusivamente ad un fenomeno di trasferimento di massa;
- qualsiasi goccia d'acqua, caduta in un singolo punto, si muove sulla superficie del bacino seguendo un percorso immutabile, legato solo alla posizione del punto;
- il tempo (tempo di corrivazione) che impiega una goccia per arrivare ad una fissata sezione del corso d'acqua (sezione di chiusura del bacino) è immutabile e dipende soltanto dal punto in cui è caduta;
- la portata, alla sezione di chiusura del bacino, si ottiene sommando tra loro le portate elementari, provenienti da tutti i punti del bacino, che si presentano allo stesso instante nella sezione.

Queste ipotesi, in pratica, equivalgono a dire che il modello è lineare e stazionario. Inoltre si suole definire come tempo di concentrazione T_c del bacino il più elevato dei tempi di corrivazione dei vari punti del bacino e la bibliografia tecnica è ricca di formule empiriche che permettono di stimarlo in funzione dei vari parametri geomorfologici del bacino sotteso. L'espressione dell'idrogramma unitario istantaneo (IUH), comune a tutti i modelli lineari, nel caso del modello cinematico, corrisponderà alla curva area-tempi del bacino, normalizzata in modo da sottendere un'area unitaria.

Le vasche di laminazione per la mitigazione del rischio idraulico

Le vasche di laminazione, o casse di espansione, sono opere idrauliche che svolgono la funzione di immagazzinare i volumi di piena e di modulare, nel tempo, il loro rilascio nel corso d'acqua. Ciò consente di ridurre il valore di picco della portata nell'asta fluviale posta a valle dell'invaso, preservando il territorio circostante dai fenomeni di esondazione. I fattori che più influenzano il funzionamento delle vasche di laminazione sono la sua dimensione e morfologia nonché le caratteristiche geometriche e idrauliche dei manufatti di alimentazione e di scarico.

In genere, le vasche di laminazione sono posizionate nel tratto medio-basso del corso d'acqua, nelle immediate vicinanze della zona da proteggere, poiché, come si vedrà in seguito, allontanandosi verso valle dalla vasca, diminuendo il rapporto tra la superficie del sottobacino sotteso dalla vasca e la superficie totale del bacino inerente la sezione di interesse, l'effetto della riduzione delle piene diviene meno sensibile, fino a diventare trascurabile.

Per evitare onerosi incrementi dei costi, generalmente, l'altezza utilizzabile per l'invaso risulta di pochi metri; per tale motivo la superficie da riservare all'opera può risultare abbastanza estesa. Pertanto le zone d'insediamento sono, spesso, prescelte tra quelle in cui i terreni sono già naturalmente soggetti ad allagamenti.

Il funzionamento idraulico della vasca di laminazione, indipendentemente dalla specifica tipologia, può essere studiato con modelli semplificati che si basano sulla soluzione numerica dell'equazione di continuità:

$$Q_i(t) - Q_o(t) = \frac{dW(t)}{dt} \quad (1)$$

nella quale $Q_i(t)$ e $Q_o(t)$ rappresentano rispettivamente la portata entrante e quella uscente dalla vasca al tempo t e $W(t)$ è il volume invasato, in questa, nello stesso tempo. La prima di tali portate deve ritenersi fissata come condizione al contorno, essendo l'idrogramma costruito tramite i modelli di afflusso-deflusso, assumendo un evento meteorico relativo al tempo di ritorno T di progetto. Nelle casse in linea l'onda di piena in ingresso all'opera coincide con quella del corso d'acqua naturale indisturbato. Nelle casse in derivazione, invece, le portate in ingresso dipendono dalla scala delle portate dell'opera di alimentazione che connette la cassa al fiume. La portata effluente Q_o dipende, invece, dalla scala di deflusso $Q_o(h)$ dell'opera (o delle opere) di scarico. Il volume invasato W è, a sua volta, funzione del livello idrico nella cassa e quindi del carico h sull'opera di scarico. In definitiva le variabili dipendenti $Q_o(t)$ e $W(t)$ possono esprimersi nella forma:

$$Q_o(t) = Q_o(t, h(t)) \quad (2)$$

$$W(t) = W(h(t)) \quad (3)$$

Nel caso in cui le aree allagate abbiano una lunghezza rilevante, e non sia quindi più accettabile l'ipotesi di funzionamento statico della cassa o dei singoli settori della stessa (superficie liquida nella cassa in ogni istante orizzontale), occorrerà utilizzare modelli di simulazione numerica basati sulle equazioni di De Saint Venant, di tipo monodimensionale o bidimensionale sul piano orizzontale, ma nulla cambia nel concetto fisico a base della schematizzazione.

Se i manufatti di scarico sono fissi, ossia non regolati da organi mobili, la $Q_o(t)$ è funzione del tempo t attraverso il solo livello idrico $h(t)$. Quest'ultima ipotesi consente di combinare le relazioni (2) e (3) nell'unica relazione:

$$Q_o(t) = Q_o(W(t)) \quad (4)$$

Supponendo che la vasca sia inizialmente vuota, il volume immagazzinato in essa, all'istante generico t , sarà fornito dalla relazione:

$$W(t) = \int_0^t (Q_i(t) - Q_o(t)) dt \quad (5)$$



Nel diagramma di figura 1 sono riportati, qualitativamente, gli andamenti della funzione $Q_i(t)$ e della connessa funzione $Q_o(t)$ per una cassa in linea.

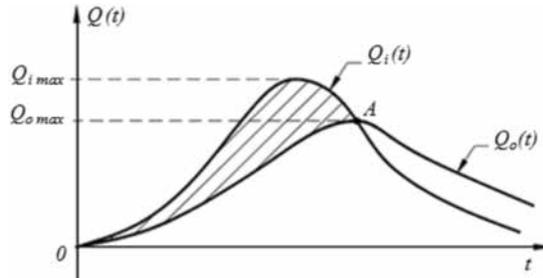


Figura 1: Idrogramma di ingresso e di uscita di una cassa di laminazione in linea

Ovviamente, finché il termine $Q_i(t) - Q_o(t)$ risulta positivo, aumenterà il valore del volume W , conseguentemente, per la (5), aumenterà anche il valore della portata uscente $Q_o(t)$; questa comincerà a decrescere solo quando il termine $Q_i(t) - Q_o(t)$ diventerà negativo. Quindi il volume massimo immagazzinato W_{max} si avrà all'istante in cui si verifica l'eguaglianza $Q_i(t) = Q_o(t)$ (punto A del diagramma di figura 1, in cui l'area tratteggiata rappresenta questo volume). Al volume massimo immagazzinato corrispondono sia il massimo tirante idrico sia, per la (5), la massima portata in uscita $Q_o \max$.

I parametri che caratterizzano le prestazioni delle casse di espansione sono:

il rapporto di laminazione:

$$\epsilon = \frac{Q_o \max}{Q_T} \quad (6)$$

l'efficienza di laminazione:

$$\eta = 1 - \epsilon \quad (7)$$

in cui:

Q_T è la portata al colmo nella sezione di chiusura del bacino in cui è ubicata vasca, per un assegnato periodo di ritorno T ;

$Q_o \max$ è il massimo colmo delle portate laminate, in uscita dalla vasca¹;

T è il periodo di ritorno della piena nella sezione di chiusura del bacino in cui è ubicata la vasca.

¹ Generalmente la massima portata al colmo dell'onda di piena in uscita non si ottiene in corrispondenza della massima portata al colmo della piena in ingresso; pertanto, normalmente, si procede simulando il fenomeno per vari eventi di piena, relativi a diverse durate di pioggia, tutte relative ad eventi con periodo di ritorno T , e $Q_{o \max}$ è il massimo colmo dell'onda di piena in uscita, tra tutte quelle corrispondenti alle varie onde di piena, in entrata.

Effetto delle vasche di laminazione nelle sezioni vallive della rete idrografica

La prima discussione sull'efficienza delle vasche di laminazione, per la mitigazione delle portate di piena, è riportata nel rapporto finale del 1917 (ASCE, 1917) della commissione nominata, negli USA, per confrontare le varie soluzioni tecniche di difesa dalle piene. Il rapporto, evidenziando che: *“La loro efficienza, tuttavia, diminuisce rapidamente all'aumentare della distanza da esse”*, fornisce uno dei primi tentativi di definire una efficienza a scala di bacino dei sistemi di vasche di laminazione. Da allora, nei quasi cento anni trascorsi da questo primo studio, si è avuta una enorme diffusione delle vasche di laminazione, ma la loro analisi, a scala di bacino, è stata affrontata da un punto di vista tecnico solo nei primi anni '70 (McCuen, 1974 e 1979), in quanto, in concomitanza di determinati eventi, si è notato che una vasca, posizionata più a monte, non poteva essere considerata efficace nei confronti di sezioni di riferimento (target) situate più a valle (Marzolo, 1933; McCuen, 1979; Emerson et al., 2005). L'efficienza di una vasca di laminazione, in corrispondenza di una qualsiasi sezione di chiusura valliva f (figura 2.b), può essere valutata in forma chiusa solo se si riesce a creare un modello capace di simulare la traslazione della portata di piena, in uscita dalla vasca, all'interno del reticolo idrografico (Bennett e Mays, 1985).

La procedura per valutare l'effetto della vasca al variare della sezione di target valliva, può essere derivata, pertanto, dalla seguente schematizzazione di validità generale, se si accetta di riferirsi al modello cinematico (Del Giudice et al., 2013a). Si consideri un generico bacino idrografico (WSf) ed un suo generico sottobacino (SWi) con sezioni di chiusura f e i , rispettivamente (figura 2). In questo contesto si possono considerare due scenari alternativi, a seconda che: (i) in corrispondenza della sezione di chiusura i del sottobacino SWi non sia presente la vasca di laminazione (figura 2.a) oppure (ii) essa sia presente (figura 2.b). L'idrogramma Q_{fv} , relativo all'intero bacino WSf, dello scenario (ii) può essere determinato sottraendo, dall'idrogramma Q_f dell'intero bacino WSf, relativo allo scenario (i), il contributo Q_{if} del sottobacino SWi in corrispondenza della sezione di chiusura f dello scenario (i), e aggiungendo il contributo Q_{of} del sottobacino SWi in corrispondenza della sezione di chiusura f dello scenario (ii) (James et al, 1987; Di Natale et al, 1999; Miotto et al, 2006; Del Giudice et al., 2013a).

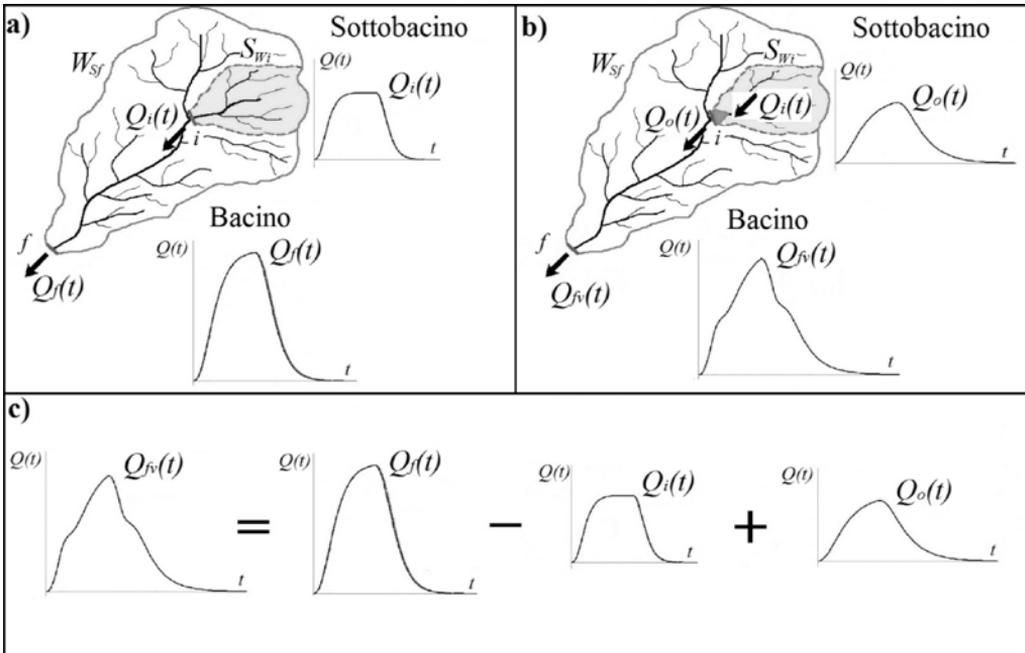
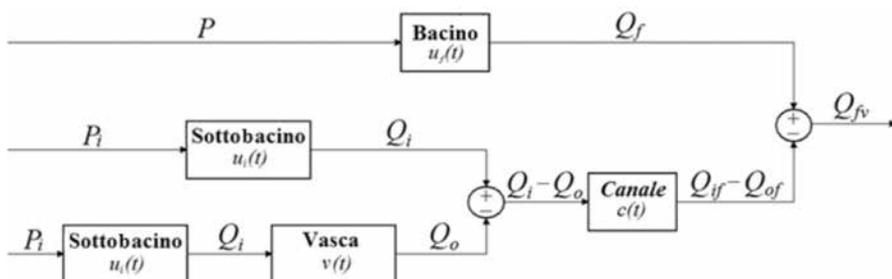


Figura 2 Rappresentazione schematica dell'effetto vallivo di una singola vasca di laminazione

Nella figura 2, Q_i e Q_o rappresentano gli idrogrammi di S_{Wf} in uscita dalla sezione di chiusura i per gli scenari (i) e (ii), rispettivamente. Nella figura 2.c sono rappresentati gli idrogrammi coinvolti nel processo.

L'utilizzo del modello del canale lineare, alla base del modello cinematico, permette di determinare il tempo t_{if} di traslazione dei due idrogrammi dalla sezione i alla sezione f ; tempo che, nel caso di figura 2, sarà $t_{if} = t_{cf} - t_{ci}$ dove i tempi t_{cf} e t_{ci} sono, rispettivamente, il tempo di corrivazione nella sezione f ed in quella i .

Poiché il modello di trasformazione afflussi-deflussi utilizzato è di tipo lineare, gli effetti di ogni evento meteorico possono essere determinati utilizzando l'idrogramma unitario istantaneo (IUH) del bacino. Infatti, con riferimento allo schema a blocchi di figura 3, utilizzando una funzione IUH per descrivere il processo di trasformazione afflussi-deflussi del bacino, $u(t)$, una funzione di risposta lineare per simulare sia la vasca di laminazione, $v(t)$, che il tratto fluviale di collegamento tra la sezione i e quella f , $c(t)$, si può determinare l'IUH modificato dell'intero bacino W_{Sf} (figura 2.b) per effetto di una vasca situata in una generica sezione di monte i , tramite la convoluzione dei sistemi lineari in serie. In tal modo, l'effetto, e quindi l'efficienza di laminazione della vasca, per eventi di periodo di ritorno T , potrà essere determinata utilizzando direttamente l'IUH modificato in seguito alla realizzazione della vasca in i .



La convoluzione dell'IUH modificato relativo al sistema descritto, riportato nello schema a blocchi di figura 3, consente di stimare l'efficienza della vasca di laminazione in qualsiasi punto del reticolo idrografico, e quindi permette di ricavare la riduzione della portata di piena in qualsiasi sezione della rete fluviale per effetto di una vasca di laminazione ubicata a monte. Utilizzando un modello cinematico avente IUH rettangolare per simulare la trasformazione afflussi-deflussi dei bacini, il modello del serbatoio lineare per simulare la vasca di laminazione ed il modello del canale lineare per rappresentare il tratto fluviale compreso tra la sezione i e quella f, la convoluzione dell'IUH modificato presenta una soluzione analitica in forma chiusa (Del Giudice et al., 2013a). In particolare, ipotizzando che la durata della pioggia t_r sia maggiore di t_{cf} (tempo di corrivazione del bacino WSf), considerando una curva di probabilità pluviometrica biparametrica, con parametri aT e n , e definendo i seguenti parametri adimensionali:

- φ_i, φ_f i coefficienti di afflusso di SWi e WSf, rispettivamente;
 - $S_i = (\varphi_i A_i)/(\varphi_f A_f)$, il rapporto tra le aree nette in cui A_i e A_f sono l'area di SWi e WSf, rispettivamente;
 - $K_i = k_i/t_{cf}$, costante di tempo adimensionale del serbatoio lineare;
 - $\bar{t}_r = t_r/t_{cf} \geq 1$, durata della pioggia adimensionale;
 - $\bar{t}_{ci} = t_{ci}/t_{cf}$, tempo di corrivazione adimensionale;
 - $\bar{t}_{if} = t_{if}/t_{cf}$, tempo di rete adimensionale;
- si ottiene la soluzione analitica che rappresenta l'efficienza della vasca al variare della durata \bar{t}_r

$$\eta_f = 1 - \bar{t}_r^{n-1} \left\{ 1 - S_i \left[\frac{K_i}{\bar{t}_{ci}} e^{-\frac{\bar{t}_r - \bar{t}_{if}}{K_i}} \left(e^{\frac{\bar{t}_{ci}}{K_i}} - 1 \right) \right] \right\} \quad (8)$$

La relazione (8) consente di ottenere un valore corretto dell'efficienza di laminazione per un rapporto tra le aree compreso nell'intervallo $0 < S_i \leq 0.8$ (Del Giudice et al., 2013a).

L'efficienza minima della vasca si ottiene per $\bar{t}_r = 1$, ovvero per la durata della pioggia cui corrisponde la massima portata al colmo di piena nella sezione valliva di riferimento:

$$\eta_f = S_i \left[\frac{K_i}{\bar{t}_{ci}} e^{-\frac{1 - \bar{t}_{if}}{K_i}} \left(e^{\frac{\bar{t}_{ci}}{K_i}} - 1 \right) \right] \quad (9)$$



La relazione (9) rappresenta una semplice equazione analitica che permette di stimare l'efficienza minima della vasca di laminazione in una qualsiasi sezione valliva del reticolo idrografico.

L'analisi di sensitività della (9) ha evidenziato (Del Giudice et al., 2013a) che il parametro che incide maggiormente sulla minima efficienza è il rapporto tra le aree nette. Tale risultato discende anche dal fatto che i parametri \bar{t}_{ci} e \bar{t}_{if} sono legati alla superficie dei bacini. Infatti analizzando il legame funzionale presente tra il tempo di corrivazione t_{ci} , espresso in ore, e l'area netta ($\varphi_i A_i$), espressa in km², di 50 bacini idrografici presenti nel sud Italia peninsulare (Del Giudice et al., 2013b) si ricavata la seguente relazione empirica

$$t_{ci} = 1.78 \cdot (\varphi_i A_i)^{0.35} \quad (10)$$

L'espressione (10) consente di ricavare una relazione tra i parametri adimensionali \bar{t}_{ci} e S_i

$$\bar{t}_{ci} = S_i^{0.35} \quad (11)$$

Inoltre tra i parametri t_{ci} e t_{if} , ipotizzando che la vasca sia ubicata lungo l'asta principale del bacino idrografico sotteso dalla sezione valliva, sussiste la relazione

$$t_{if} = t_{cf} - t_{ci} \quad (12)$$

L'espressione (12) consente di ricavare una relazione tra i parametri adimensionali \bar{t}_{if} e S_i

$$\bar{t}_{if} = 1 - \bar{t}_{ci} = 1 - S_i^{0.35} \quad (13)$$

Nella figura 4 è riportato l'andamento dell'efficienza minima al variare del rapporto tra le aree, considerando valide le relazioni (11) e (13) ed assumendo $K_i = 0.5$. Dalla figura si nota la riduzione esponenziale dell'efficienza della vasca all'aumentare dell'area del bacino sotteso dalla sezione valliva (target). Ad esempio, si osserva una riduzione del 50% della efficienza minima in corrispondenza di un'area del bacino totale tre volte maggiore del sottobacino sotteso dalla vasca. Tale comportamento evidenzia che le vasche di laminazione hanno un effetto localizzato per cui la difesa dalle piene a scala di bacino può essere assicurata utilizzando più vasche da realizzare in maniera diffusa sull'intero reticolo idrografico.

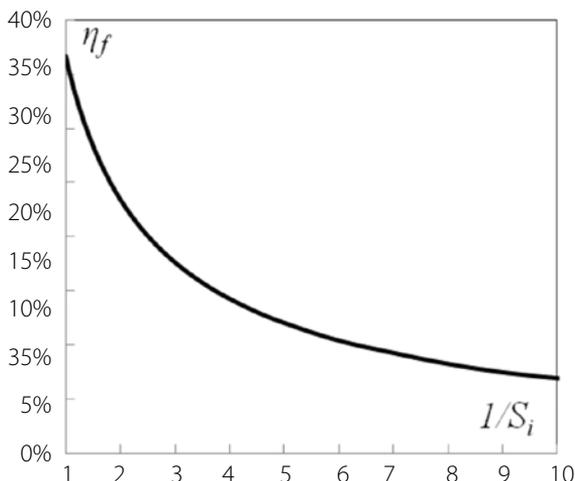


Figura 4 Andamento dell'efficienza di laminazione al variare del rapporto tra le aree

Effetto a scala di bacino dei sistemi di vasche di laminazione

L'analisi dell'efficienza complessiva di un sistema di vasche consiste nel definire la configurazione ottimale (numero, volumi e posizione delle vasche) nel rispetto di una funzione obiettivo quale ad esempio la minimizzazione dei costi di realizzazione e di manutenzione delle opere. Di recente sono state proposte diverse tipologie di algoritmi di ottimizzazione per individuare l'ubicazione delle vasche in grado di massimizzarne l'efficienza complessiva in termini di controllo delle portate di picco durante gli eventi di piena, nel rispetto della condizione di minimo costo (Mays e Bedient, 1982; James et al., 1987; Yeh e Labadie, 1997; Behera et al., 1999; Emerson et al., 2005; Goff e Gentry, 2006).

Solitamente gli algoritmi di ottimizzazione sono utilizzati insieme ai software di simulazione idrologica e idraulica. Infatti, diversi software commerciali, quali: HEC-HMS (Emerson et al., 2005; Goff e Gentry, 2006), NRCS TR-20 (McCuen, 1979), SWMM Extran-link-node model (Tsihrintzis et al., 1998) sono ampiamente utilizzati per analizzare e simulare i sistemi di vasche. In alternativa diversi autori hanno creato specifici software per determinare gli idrogrammi in uscita dalle vasche applicando modelli dell'idrologia completi (Hall et al., 1993; Chen et al., 2007) o semplificati (Hong, 2008; Camnasio e Becciu, 2011).

Comunque, per applicare gli algoritmi di ottimizzazione, occorre acquisire una serie di informazioni che normalmente sono frutto di indagini preliminari molto costose. Per evitare, almeno nella fase di programmazione, questi costi si è proposto un semplice approccio, basato sulla teoria dei sistemi lineari, per stimare, mediante una semplice equazione analitica, l'efficienza di una o più vasche in una qualsiasi sezione valliva del corso d'acqua.



Un generico sistema di vasche può essere realizzato disponendo le vasche in serie o in parallelo tra di loro. Quindi, analizzando l'effetto di sistemi di vasche in serie ed in parallelo si riesce in qualche modo ad analizzare qualsiasi disposizione topologica delle vasche. Nel prosieguo, utilizzando il modello cinematico per simulare la trasformazione afflussi-deflussi dei bacini e il modello del serbatoio lineare per simulare le vasche di laminazione, si forniscono le relazioni valide nel caso dei due sistemi indicati.

- Sistemi di vasche in parallelo

La disposizione delle vasche in parallelo risulta concorde con le ipotesi adottate dal modello cinematico utilizzato per il bacino. Infatti in questo caso le vasche possono essere considerate come dei serbatoi lineari disposti all'interno di un sistema di canali lineari in parallelo, in cui ogni vasca agisce sul proprio sottobacino senza interferire con le altre. L'efficienza minima di un sistema composto da N vasche, con riferimento ad una sezione valliva f, è uguale alla sommatoria delle efficienze minime delle singole vasche valutate nella medesima sezione.

$$\eta_f = \sum_{i=1}^N \left[S_i \frac{K_i}{\bar{\tau}_{ci}} e^{-\frac{1-\bar{\tau}_{if}}{K_i}} \left(e^{\frac{\bar{\tau}_{ci}}{K_i}} - 1 \right) \right] = \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (14)$$

- Sistemi di vasche in serie

La soluzione in forma chiusa dell'efficienza minima dei sistemi di vasche in serie è rappresentabile mediante una relazione analitica di maggiore complessità rispetto al caso precedente a causa dell'interferenza esistente tra le diverse vasche. Anche in questo caso la minima efficienza di laminazione si ottiene per una durata della pioggia pari al tempo di corrivazione della sezione terminale del bacino (sezione target). La suddetta relazione, che si omette per semplicità espositiva e che risulta poco pratica in fase di progettazione preliminare, può essere rappresentata da una più semplice funzione regressiva che lega la minima efficienza complessiva del sistema di vasche nella sezione target, η_f , alle minime efficienze delle singole vasche, η_i , valutate nella medesima sezione

$$\eta_f = f(\eta_i(K_i, \bar{\tau}_{ci}, S_i, \bar{\tau}_{if})) \quad (15)$$

La funzione regressiva utilizzata è data dalla combinazione lineare delle efficienze delle singole vasche nella sezione target poiché semplifica la sua applicazione nel caso di sistemi di vasche in serie e parallelo

$$\eta_f = a_1 \eta_1 + a_2 \eta_2 + \dots + a_i \eta_i + \dots + a_N \eta_N \quad (16)$$

I coefficienti della precedente relazione sono stati determinati effettuando una regressione multipla. In particolare sono stati analizzati tre sistemi in serie, composti da due, tre e quattro vasche. Per ogni sistema si sono

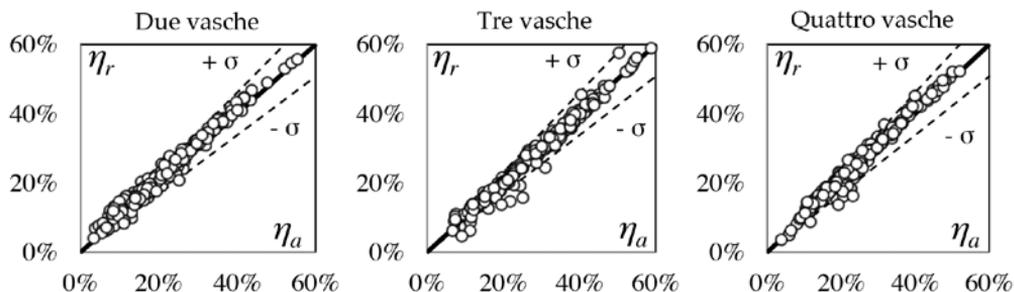
generati, utilizzando il metodo Montecarlo, 5000 efficienze complessive utilizzando la formulazione analitica e facendo variare i parametri adimensionali nel loro intervallo di variazione (Del Giudice et al., 2013a). L'analisi regressiva delle suddette efficienze, mediante la relazione (16), ha permesso di ottenere i coefficienti riportati nella tabella 1

Coefficienti	2 vasche	3 vasche	4 vasche
a1	1.03	1.04	1.02
a2	-0.72	-0.68	-0.71
a3	/	0.49	0.48
a4	/	/	-0.4

Tabella 1 Coefficienti della relazione dei sistemi in serie

In particolare, osservando la tabella 1, si nota che i coefficienti di regressione assumono, per lo stesso ordine di vasca, valori praticamente coincidenti e segni alternativamente variabili. Per tale motivo nelle applicazioni successive sono stati utilizzati i seguenti valori $a_1=1$, $a_2 = -0.7$, $a_3 = 0.5$ ed $a_4 = -0.4$.

Nella figura 5 si riporta il confronto tra l'efficienza η_a ottenuta dalla relazione analitica e l'efficienza η_r ottenuta mediante la relazione di regressione (16) considerando i tre sistemi precedentemente analizzati.



Lo scarto quadratico medio σ assume valori 0.15, 0.14 e 0.14 rispettivamente per il caso di due, tre e quattro vasche. Nella figura 5 è riportato l'intervallo corrispondente a $\pm \sigma$. In particolare, per il caso di due vasche si è valutato che circa l'80% delle 5000 generazioni ricade all'interno dell'intervallo, mentre per il caso di tre e quattro vasche circa il 90% di generazioni ricade all'interno dell'intervallo.

I coefficienti di determinazione, che risultano $R^2 = 0.96$, $R^2 = 0.98$ e $R^2 = 0.97$, per il caso di due, tre e quattro vasche rispettivamente, evidenziano l'attendibilità dell'espressione (16).

**Esempio applicativo:
schema topologico del grande progetto Sarno**

Nella figura 6 è riportato uno stralcio planimetrico del bacino del F. Sarno, con l'individuazione delle varie fasce di pericolosità idraulica (P.S.A.I. 2011, Autorità di Bacino del Sarno) mentre nella figura 7 è riportato lo stesso

stralcio planimetrico con l'individuazione delle varie aree ricadenti nelle diverse fasce di rischio (P.S.A.I. 2011, Autorità di Bacino del Sarno). Appare evidente, dall'esame delle due figure, che nel bacino del Sarno il problema della difesa dalle piene interessa, per lo più, il tratto medio-basso del fiume per la maggiore esposizione del territorio di pianura al rischio idraulico.

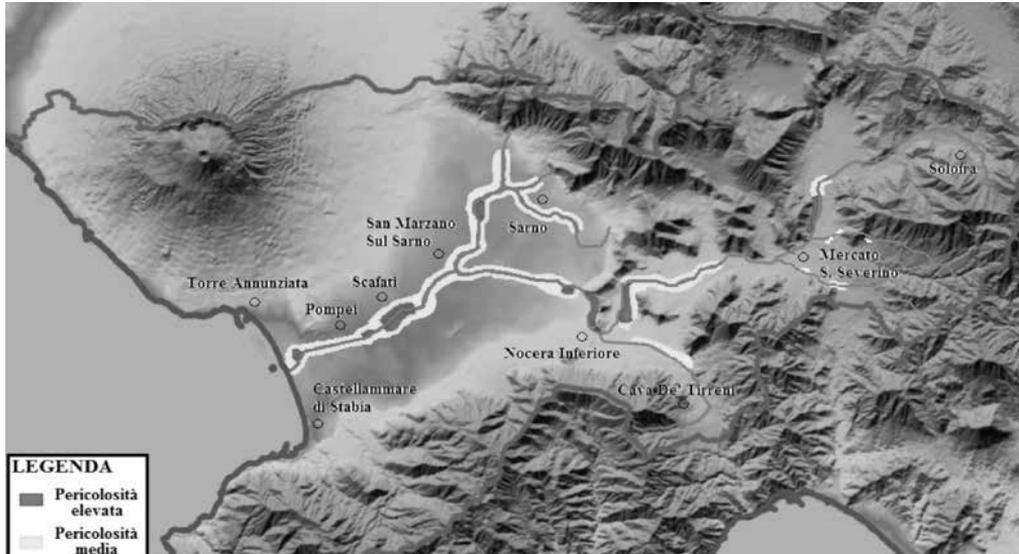


Figura 6 Fasce di pericolosità idraulica del F. Sarno

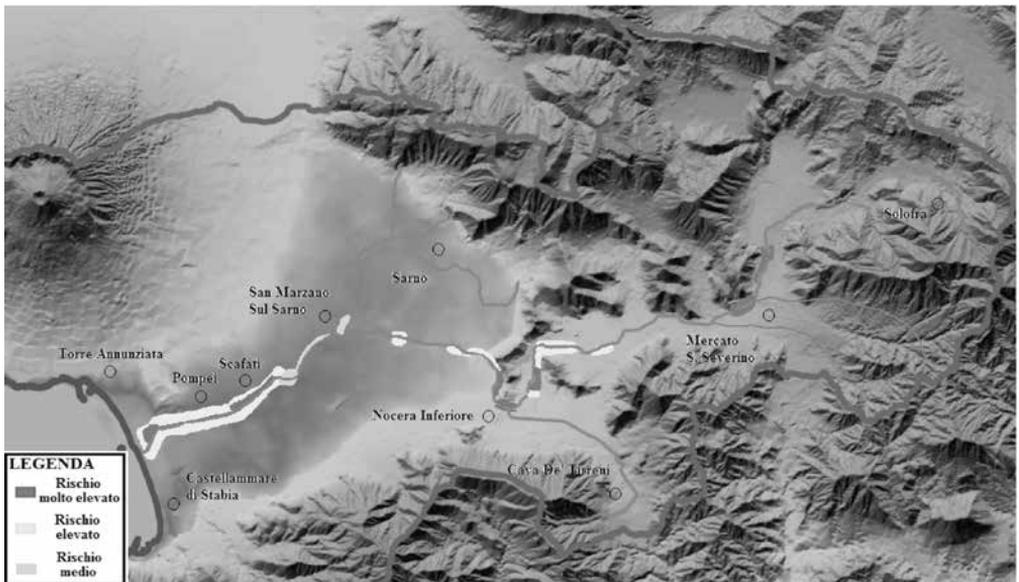


Figura 7 Fasce di rischio idraulico del F. Sarno



Per ridurre il rischio idraulico che si riscontra in corrispondenza del territorio di pianura del bacino idrografico del fiume Sarno, la regione Campania ha deliberato la realizzazione del Grande Progetto Sarno (GPS). Quest'ultimo nasce come attuazione della pianificazione di bacino ed, in particolare, delle azioni previste nel vigente "Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico". Si incardina nell'ambito dell'ASSE 1 – "Sostenibilità Ambientale ed Attrattività Culturale e Turistica" del POR Campania FESR – QCS 2007-2013 ed è riferibile direttamente all'Obiettivo Specifico 1.b "Rischi naturali" dell'ASSE 1. In particolare prevede la realizzazione di un sistema integrato di interventi di sistemazione idraulica e riassetto ambientale articolati in quattro "Priorità" funzionali alla strategia di riassetto idraulico-morfologico individuata:

- Completamento della riqualificazione idraulica ed ambientale del basso corso del fiume Sarno attraverso la realizzazione della seconda Foce, ovvero, mediante la modifica dell'opera idraulica denominata "traversa di Scafati", la rifunzionalizzazione del canale Bottaro e di una parte del c.d. Canale Conte Sarno e la riqualificazione dell'ambito costiero interessato dalla nuova foce (Priorità A1);
- Sistema di vasche di laminazione ed aree di espansione controllata per il trattenimento a monte dei volumi di piena, opportunamente integrate nel contesto ambientale e paesaggistico (Priorità A2);
- Sistemazione idraulica di alcuni tratti del reticolo principale e minore con contestuale bonifica dei sedimenti in alveo e riqualificazione dell'ambiente fluviale al fine di ricostituire continuità delle aree periferiali e connessioni trasversali utili alla fruizione compatibile (Priorità B e C);
- Attivazione di misure finalizzate ad attività di monitoraggio e Protezione Civile ("11..-Progetto immateriale di monitoraggio e Protezione Civile").

² <http://www.arcadis.campania.it/index.php/grande-progetto-sarno>

Il GPS sviluppa ed estende, a scala di bacino idrografico, le ipotesi di sistemazione idraulica ed ambientale già in parte considerate nello "Studio Preliminare Strategico" e nello "Studio di Impatto Ambientale" (S.I.A.) dell'AdB Sarno relativi al "Progetto esecutivo degli interventi di bonifica e rimozione dei sedimenti inquinati nonché di sistemazione idraulica del fiume Sarno, limitatamente al tratto finale compreso tra la traversa di Scafati e la foce del fiume Sarno", nonché nello "Scenario Globale di Riassetto Idraulico ed Ambientale del Bacino del Sarno" Approvato dal Comitato Istituzionale - Autorità di Bacino del Sarno nella seduta del 31.03.2009 e successivamente confluito nel "Piano di Lavoro", di cui alla D.G.R. n. 326 del 06.03.2009.

Nella figura 8, in cui è riportata la planimetria generale degli interventi previsti nel GPS², è possibile individuare la posizione delle vasche di laminazione da realizzare. Nella tabella 2 sono riportate le portate



idrologiche delle sezioni in cui sono previste le vasche, l'area dei sottobacini sottesi dalle diverse vasche, i tempi di corrivazione relativi alle diverse sezioni in cui è prevista l'ubicazione delle vasche valutati in base alla relazione (10) e i tempi di rete adimensionale valutati in base alla relazione (12). I dati elencati in tabella 2 sono stati ricavati dal Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.S.A.I. 2011) redatto dall'Autorità di Bacino del Sarno e dalla Sistemazione Idraulica dei fiumi Sarno e Solofrana, 2005, prevista dal Consorzio di Bonifica integrale comprensorio Sarno.

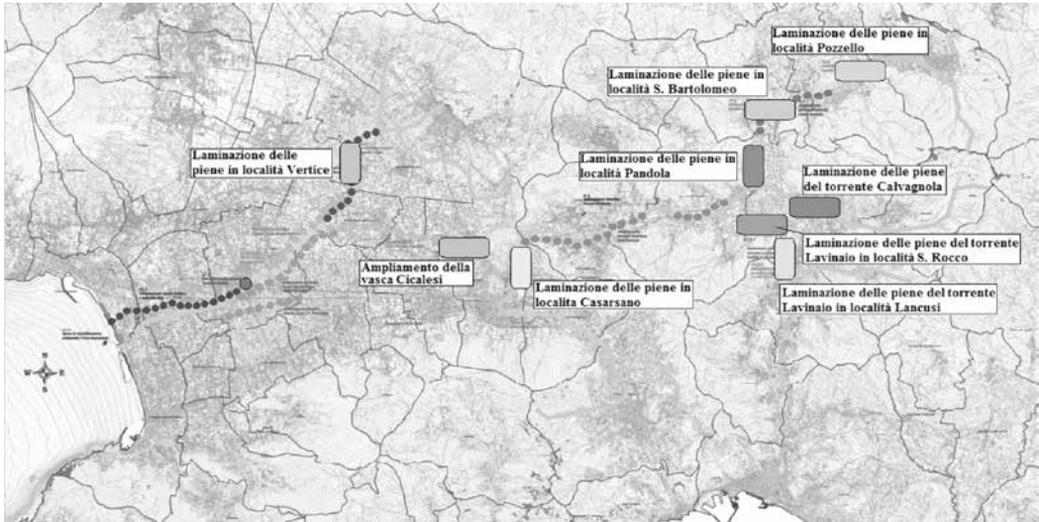


Figura 8 Planimetria generale degli interventi previsti dal Grande Progetto Sarno

N	Nome vasca	Comune	Portata idrologica [m ³ /s]	Area Bacino [Km ²]	Tempi di Corrivazione [h]	Tempi di rete [h]
1	Pozzello	Montoro Superiore (AV)	208	39,45	6,44	7,46
2	San Bartolomeo	Montoro Inferiore (AV)	235	43,94	6,69	7,21
3	Pandola	Mercato San Severino (SA)	340	67,95	7,79	6,11
4	Calvagnola	Fiscina (SA)	115	20,47	5,12	8,78
5	Lancusi	Fiscina (SA)	91	11,65	4,20	9,70
6	San Rocco	Fiscina (SA) Mercato San Severino (SA)	159	23,01	5,33	8,57
7	Casarsano	Nocera Inferiore (SA)	514	187,72	11,12	2,78
8	Ampliamento Vasca Cicalesì	Nocera Inferiore (SA)	499	232,98	11,99	1,91
9	Vertice	Striano (SA) - Poggiomarino (NA) Scafati (SA) - San Valentino (SA)	274	77,91	8,17	5,73

Tabella 2 Caratteristiche delle vasche e dei relativi sottobacini

La metodologia proposta è stata applicata allo schema topologico delle vasche previsto dal GPS ipotizzando che ognuna di esse sia dimensionata per garantire un'efficienza di laminazione $\eta_i = 30\%$ e sia caratterizzata da un costante di tempo adimensionale del serbatoio lineare $K_i = 0.45$ compresa nel campo di variazione indicato in letteratura (Del Giudice et al., 2013a). In particolare, l'analisi dell'effetto vallivo del sistema di vasche è stata effettuata in corrispondenza della traversa ubicata nella città di Scafati (sezione target) che sottende un bacino idrografico avente una superficie di circa 355 km² e caratterizzata da un tempo di corrivazione di circa 13.90 ore in base al quale sono stati ricavati, utilizzando la relazione (12), i tempi di rete riportati nella tabella 2.

Nella tabella 3 si riporta la minima efficienza di laminazione di ogni singola vasca in corrispondenza della sezione di target utilizzando la relazione (9).

NOME VASCA	EFFICIENZA DI LAMINAZIONE IN CORRISPONDENZA DI SCAFATI [%]
Pozzello	4,4%
San Bartolomeo	4,9%
Pandola	7,6%
Calvagnola	2,3%
Lancusi	1,3%
San Rocco	2,6%
Casarsano	21,0%
Ampliamento Vasca Cicalesì	26,1%
Vertice	8,7%

Tabella 3 Riduzioni di portata in corrispondenza della traversa di Scafati (sezione target)

Utilizzando la procedura proposta è inoltre possibile determinare l'efficienza complessiva di laminazione di un sistema di vasche composto da una generica combinazione di vasche previste nel GPS. In particolare, impiegando la numerazione riportata all'interno della prima colonna della tabella 2 è possibile individuare l'efficienza complessiva di più combinazioni di vasche previste dal progetto.

Nella terza colonna della tabella 4 si riporta, in ordine crescente, l'efficienza di laminazione η_r , ricavata combinando le relazioni (14) e (16), di 15 diverse combinazioni di vasche previste nel GPS. All'interno della stessa tabella si riporta anche l'efficienza di laminazione η_a delle stesse combinazioni valutate analiticamente. Il confronto tra le efficienze ottenute utilizzando

le relazioni (14) e (16), e la procedura analitica sono riportati all'interno della figura 9 dalla quale si evince la buona attendibilità della relazione approssimata (16).

N	Vasche	η_r [%]	η_a [%]
1	2 3	4,2%	3,8%
2	1 3	4,5%	4,7%
3	1 2 3	6,4%	5,3%
4	3 4	9,9%	9,9%
5	3 5 6	9,3%	8,7%
6	3 4 5	11,2%	10,7%
7	3 4 5 6	11,6%	11,9%
8	3 4 5 6 7	12,9%	13,0%
9	1 2 3 4 5 6 7	13,8%	13,5%
10	3 5 6 7	14,5%	14,4%
11	3 7	15,7%	15,6%
12	3 8	20,8%	20,2%
13	3 7 8 9	23,9%	22,9%
14	1 2 3 4 5 6 7 8 9	25,2%	23,8%
15	3 8 9	29,5%	28,2%

Tabella 4 Efficienze complessive di laminazione di 15 combinazioni di vasche

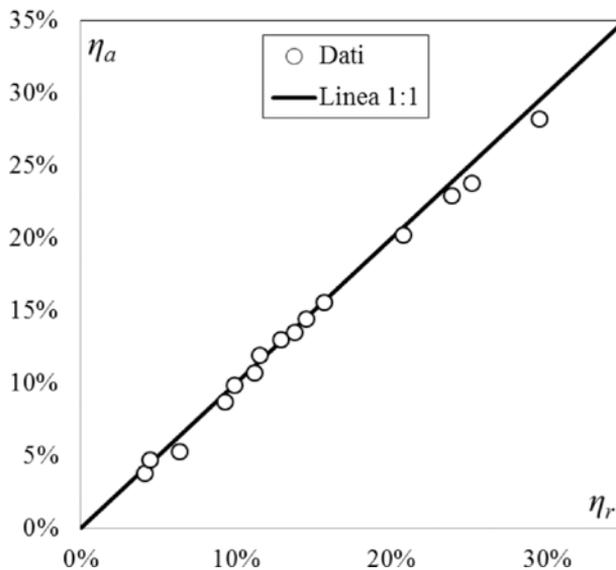


Figura 9 Confronto tra le efficienze complessive di laminazione valutate con le relazioni semplificate ed analiticamente

A titolo esemplificativo la combinazione di vasche 13, rappresentata in figura 10, è ricavabile mediante la seguente relazione

$$\eta_r = \eta_9 + (\eta_8 - 0.7\eta_7 + 0.5\eta_3) = 8.7\% + (26.1\% - 0.7 \cdot 21\% + 7.6 \cdot 5\%) = 23.9\% \quad (17)$$

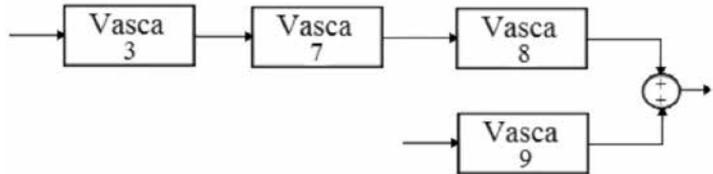


Figura 9 Combinazione 13

Le precedenti analisi evidenziano che la maggiore incidenza sull'efficienza è dovuta alle vasche posizionate in prossimità della sezione target. Inoltre, si nota un effetto negativo delle vasche posizionate in serie, infatti la combinazione in cui si considerano tutte le vasche presenta una efficienza minore rispetto ad altre combinazioni in cui si considerano solo le vasche presenti nelle vicinanze della sezione di riferimento.

I risultati ottenuti dal confronto tra le relazioni semplificate ed il modello analitico consentono di affermare che l'errore commesso utilizzando le relazioni semplificate risulta tecnicamente trascurabile.