

## PROGETTAZIONE DI UNA CASSA D'ESPANSIONE E DETERMINAZIONE DELLA RIDUZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO CON MODELLAZIONE 2D

C. Nasello<sup>1</sup>, M. Sinagra<sup>2</sup>, P. Amato<sup>3</sup>, T. Tucciarelli<sup>4</sup>, T. Moramarco<sup>5</sup>

- (1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali, Università di Palermo, Italia, e-mail: [carmelo.nasello@unipa.it](mailto:carmelo.nasello@unipa.it)
- (2) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali, Università di Palermo, Italia, e-mail: [marco.sinagra@unipa.it](mailto:marco.sinagra@unipa.it)
- (3) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali, Università di Palermo, Italia, e-mail: [pieama@gmail.com](mailto:pieama@gmail.com)
- (4) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali, Università di Palermo, Italia, e-mail: [tullio.tucciarelli@unipa.it](mailto:tullio.tucciarelli@unipa.it)
- (5) Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, CNR Perugia, Italia, e-mail: [T.Moramarco@irpi.cnr.it](mailto:T.Moramarco@irpi.cnr.it)

### SOMMARIO

*Nell'articolo si studia l'effetto di una cassa d'espansione posta a monte di un'area fluviale soggetta a rischio idraulico. Lo strumento utilizzato è un software bidimensionale sviluppato per simulare la propagazione delle piene fluviali. Il dominio di calcolo è rappresentato da una mesh triangolare non strutturata con una maggiore densità di elementi all'interno dell'alveo e nelle zone immediatamente limitrofe. Per facilitare gli accumuli temporanei di parte dei volumi di piena, si ipotizza la costruzione di un restringimento dell'alveo per mezzo di due pareti verticali che avvicinano le sponde fluviali. Durante la piena, il passaggio per lo stato critico nel restringimento provoca un rigurgito a monte, e quindi un agevole riempimento della cassa d'espansione. La perimetrazione di tale cassa è definita con la costruzione di un rilevato arginale di adeguata altezza. Per meglio simulare il rigurgito a monte della strozzatura, si introduce una scabrezza equivalente negli elementi della strozzatura, per riprodurre le perdite di carico nel restringimento e nel successivo risalto idraulico, malgrado l'ipotesi diffusiva utilizzata nel software di calcolo. La conoscenza delle aree allagate in due eventi di piena storici e dei due relativi idrogrammi di piena, ha consentito la determinazione del coefficiente di Manning quale misura della scabrezza in alveo e fuori alveo.*

*Mediante l'applicazione del modello proposto è possibile validare sia il posizionamento degli argini a monte del restringimento per il contenimento della piena, sia la riduzione delle aree di valle soggette a rischio idraulico.*

### 1 INTRODUZIONE

Tra gli interventi di ingegneria idraulica finalizzati alla mitigazione della vulnerabilità delle aree inondabili trovano applicazione le casse di espansione. Esse consentono l'accumulo temporaneo di un'aliquota del volume dell'onda di piena e la

restituzione ritardata nel tempo, consentendo così la riduzione quantitativa del colmo di piena nelle zone da salvaguardare. La quantificazione del volume di laminazione dipende da numerosi fattori, tra i quali la forma e la durata dell'idrogramma in ingresso e la legge di restituzione delle portate. Tale problematica è stata affrontata da alcuni autori in modo più o meno completo, tenendo conto delle sole piogge (Guo, 1999) o accoppiando i processi idraulici con processi idrologici (Guo, 2001; De Martino et al., 2002). Altri approcci sono basati sulla quantificazione diretta del volume di piena, utilizzando dati storici (Bacchi et al., 1988; Brath et al., 1994). Nel presente lavoro si presenta un approccio numerico che, utilizzando un modello di propagazione bidimensionale, consente di progettare e verificare il volume di una cassa di espansione valutando gli effetti che essa induce sul rischio idraulico nelle aree a valle dell'opera di laminazione.

## 2 LA MODELLAZIONE DEI RESTRINGIMENTI IN ALVEO

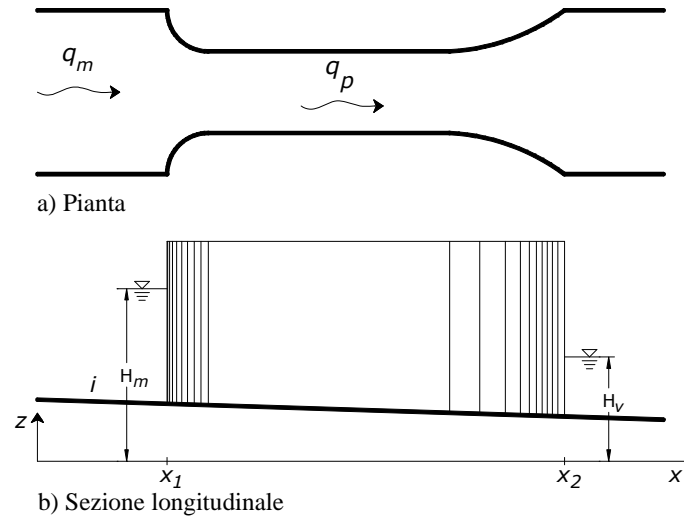
La propagazione di eventi di piena può essere efficacemente modellata attraverso l'utilizzo di modelli diffusivi di acque basse (Aricò et al., 2010). La presenza di un restringimento in alveo può però generare la sussistenza di un risalto idraulico che non può essere riprodotto dai suddetti modelli, che quindi sottostimano l'entità del rigurgito indotto nella sezione di monte. In corrispondenza del risalto, si manifestano infatti delle perdite di carico localizzate che dipendono dalla dissipazione turbolenta dell'energia cinetica della corrente e che dunque verrebbero ignorate dal modello diffusivo. Per ridurre tale errore, il modello adottato utilizza nella zona del restringimento un coefficiente di scabrezza equivalente, in grado di fornire un rialzo della corrente a monte pari a quello che è possibile calcolare mediante la modellazione completa.

In particolare, in ogni elemento della griglia di calcolo del modello viene definita una relazione  $n_r(q_p)$ , essendo  $q_p$  il flusso per unità di larghezza nella direzione del moto calcolato nel centro dell'elemento ed  $n_r$  la scabrezza equivalente.

Seguendo un approccio monodimensionale e stazionario, l'innalzamento della superficie libera che si realizza a monte del restringimento (Fig. 1), viene calcolato dopo avere verificato la presenza del risalto. Volendo relazionare la scabrezza  $n_r$  alla sola portata specifica  $q_p$ , viene quindi fatta l'ulteriore ipotesi che, in mancanza di risalto, l'energia  $E_0$  della corrente a monte sia quella corrispondente alla condizione di moto permanente, pari a:

$$E_0 = \left( \frac{n \cdot r_r \cdot q_p}{\sqrt{S_f}} \right)^{3/5} + \left( \frac{S_f \cdot (r_r \cdot q_p)^{4/3}}{n^2 (2g)^{5/3}} \right)^{3/5} \quad (1)$$

dove  $n$ ,  $r_r$ ,  $q_p$ ,  $S_f$  e  $g$  sono rispettivamente il coefficiente di scabrezza di Manning, il coefficiente di contrazione, la portata specifica attraverso il restringimento, la pendenza motrice della corrente a monte dello stesso e l'accelerazione di gravità.



**Figura 1.** Schema del restringimento e notazioni.

Qualora l'energia della corrente risulti minore dell'energia di stato critico  $E_k$ , espressa dalla (2):

$$E_k = \frac{3}{2} \left( \frac{q_p^2}{g} \right)^{1/3} \quad (2),$$

il tirante di monte è calcolato supponendo ivi un'energia pari a quella di stato critico fornita dalla (2) e pervenendo quindi alla seguente scala delle portate:

$$h_m^3 - E_k h_m^2 = - \frac{q_m^2}{2g} \quad (3).$$

Assumendo che si realizzi nel restringimento una dissipazione di energia pari a quella presente in condizioni quasi-stazionarie, nonché l'ipotesi di corrente indisturbata a valle, viene determinato un valore di scabrezza equivalente  $n_r$ , imponendo che la perdita di carico calcolata dal modello diffusivo lungo il percorso che attraversa il restringimento sia pari alla differenza fra le quote piezometriche a monte ed a valle del restringimento. Detto coefficiente è dato dalla radice della seguente equazione (4) integrata lungo il restringimento, per assegnati valori della quota piezometrica  $H_m$  (calcolata dalla (3)) e di quella di valle  $H_v$ .

$$\frac{dH}{dx} = - \frac{n_r^2 q_p^2(x)}{(H - z(x))^{10/3}} \quad (4).$$

Per tenere conto degli effetti della pendenza del fondo  $i$  e rendere l'equazione (4)

sempre facilmente risolvibile per via analitica, viene assunto che  $H - z \approx H - (z_m + z_v)/2$ , dove  $z_m$  e  $z_v$  sono le quote topografiche subito a monte ed a valle del convergente (Fig. 1).

### 3 CASO DI STUDIO

Il caso di studio riguarda un tratto di 18 km del fiume Tevere in Umbria nei pressi di Città di Castello. In tale tratto si trova la stazione idrometrica Santa Lucia le cui portate storiche saranno utilizzate nelle successive simulazioni idrauliche.

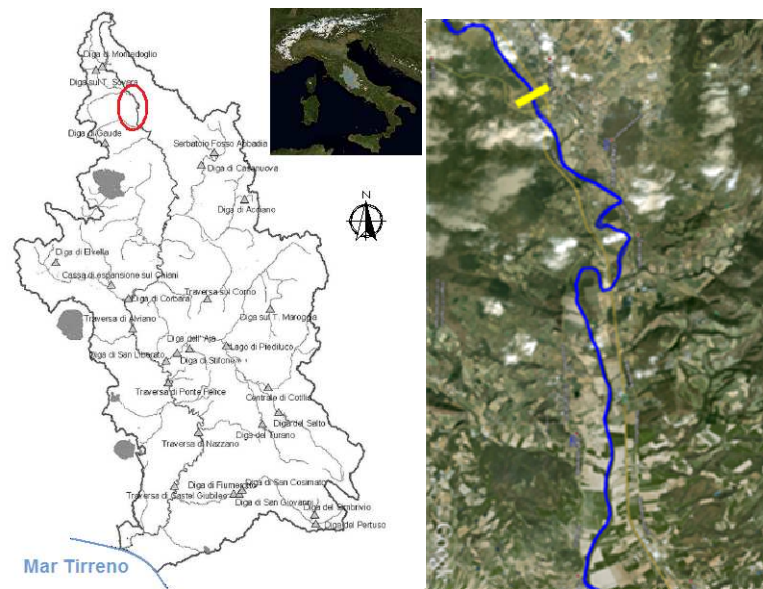
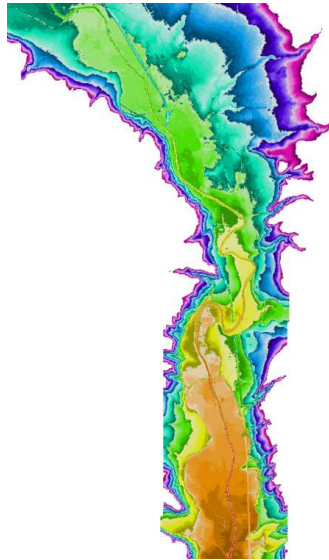


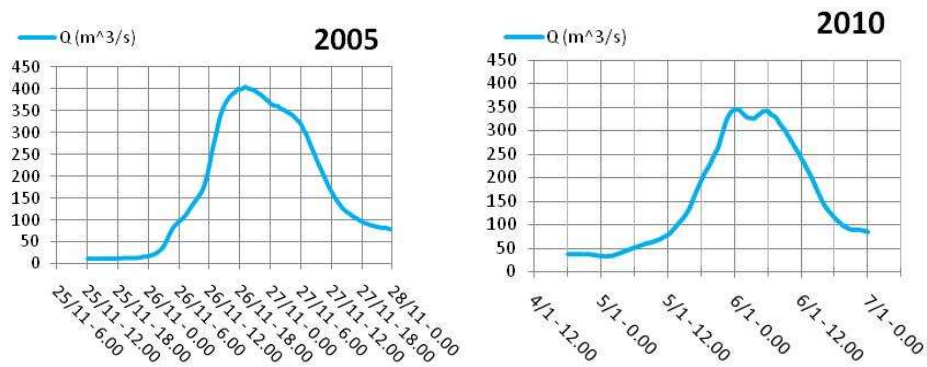
Figura 2. Il fiume Tevere in Umbria oggetto dello studio.

La morfologia del corso d'acqua e dei terreni adiacenti è rappresentata mediante DEM con risoluzione 2m\*2m (Fig. 3).



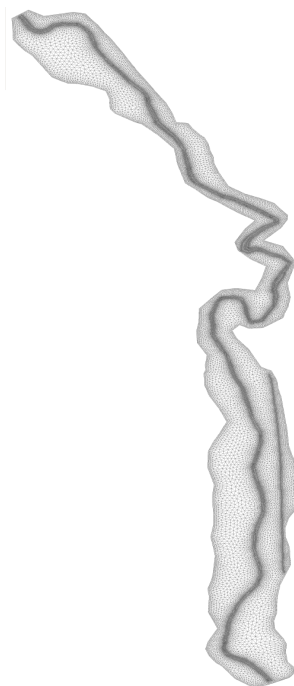
**Figura 3.** DEM 2m\*2m del tratto fluviale esaminato.

I dati idrologici utilizzati sono due eventi di piena: novembre 2005 e gennaio 2010. Fra i due, l'evento più gravoso è quello del 2005, con una portata al picco di 403 m<sup>3</sup>/s, contro i 344 m<sup>3</sup>/s del 2010. Le durate sono rispettivamente di 59 e 54 ore. Il volume della piena del 2005 è di 36Mm<sup>3</sup>, contro i 31Mm<sup>3</sup> nel 2010 (Fig. 4).



**Figura 4.** Idrogrammi di piena storici utilizzati come portate entranti.

Il dominio di calcolo è tracciato con un poligono che racchiude l'intera area di probabile allagamento. All'interno del dominio vengono tracciate alcune polilinee (forzanti) che individuano il fondo alveo, le sponde fluviali, gli argini e i rilevati stradali che indirizzano i flussi idrici durante l'esondazione. I triangoli della mesh di calcolo appoggeranno un lato su queste forzanti. La densità degli elementi triangolari è variabile da un lato minimo di 2 m ad un massimo di 10 m. In questo modo si hanno 65000 elementi e 33000 nodi (fig. 5).

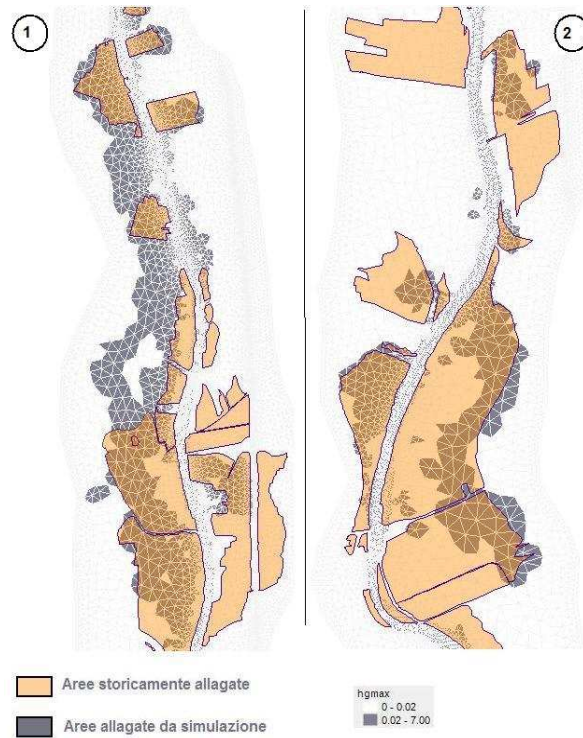


**Figura 5.** Dominio di calcolo ad elementi triangolari non strutturati.

Per l'attribuzione della scabrezza di Manning si distinguono l'alveo e le zone limitrofe ad esso.

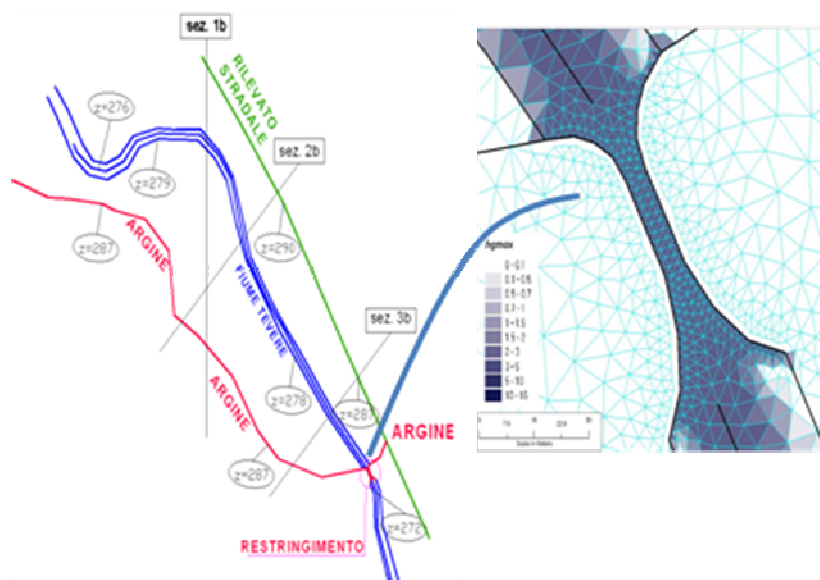
Noti i due suddetti idrogrammi di piena entranti a monte, e note le aree allagate in quei due eventi, si sono fatte diverse simulazioni al variare della scabrezza di Manning. Dal confronto fra le aree storicamente allagate e quelle simulate (fig. 6) si è pervenuti alle scabrezze  $n=0.040 \text{ s/m}^{1/3}$  per il fondo alveo, e  $n=0.060 \text{ s/m}^{1/3}$  per le zone circostanti.

La imperfetta corrispondenza fra aree allagate storicamente e aree allagate simulate (fig. 6) può attribuirsi in parte alle incertezze nella attribuzione della quota topografica del DEM, in parte alle incertezze nei rilievi delle aree storicamente allagate. Queste ultime, in genere, sono infatti rilevate dopo qualche giorno dall'evento, piuttosto che contemporaneamente all'evento stesso.



**Figura 6.** Confronto fra aree allagate storiche (2010) e quelle simulate con scabrezza  $n=0.040$   $s/m^{1/3}$  in alveo, e  $n=0.060$   $s/m^{1/3}$  nelle zone circostanti.

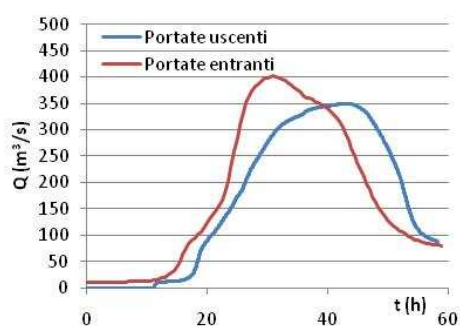
Stabiliti i valori della scabrezza per le simulazioni si è proceduto alla localizzazione di una ipotetica cassa d'espansione in linea, al fine di contenere temporaneamente parte dei volumi di piena. L'area ad allagamento preordinato, attualmente libera da insediamenti antropici, è delimitata in sinistra idraulica da un rilevato stradale e in destra da un possibile argine di nuova costruzione alto circa 6 m sul piano di campagna. Al fine di agevolare il temporaneo accumulo, si prevede un manufatto di restringimento dell'alveo di larghezza 6 m avente pareti verticali (Fig. 7).



**Figura 7.** Perimetrazione con argini della cassa d'espansione e restringimento dell'alveo a valle.

Il passaggio per lo stato critico nella strozzatura durante le piene induce una corrente lenta a monte del manufatto, con conseguente innalzamento del pelo libero e allagamento della cassa d'espansione. Tale area è ubicata nella parte iniziale di monte del tratto studiato, nei pressi di Città di Castello.

La cassa d'espansione, a monte della strozzatura, è tutta interessata da allagamenti. Per laminazione la portata al colmo di piena (anno 2005) diminuisce da 403 m<sup>3</sup>/s a 350 m<sup>3</sup>/s. Il volume temporaneamente invasato è di 2.4 Mm<sup>3</sup> (Fig. 8)

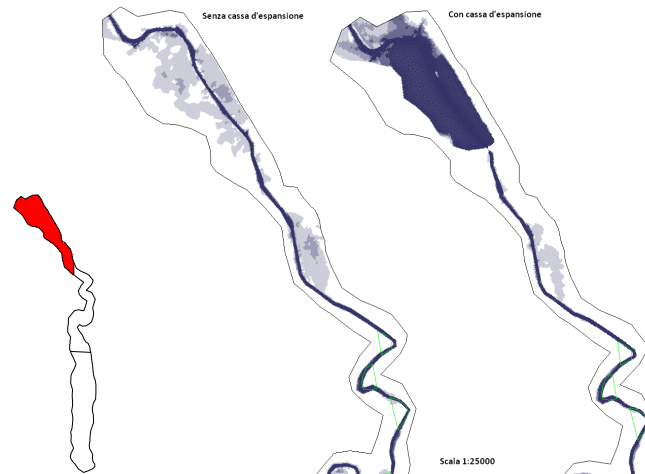


**Figura 8.** Portate entranti nella cassa d'espansione e portate uscenti per l'evento del 2005.

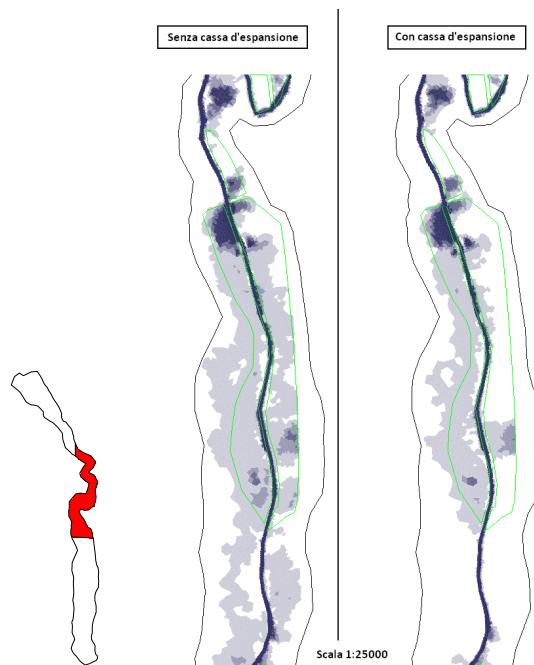
Passiamo al confronto fra le aree allagate a valle della strozzatura nelle due situazioni con e senza la cassa d'espansione. Si vede che, introducendo la cassa d'espansione, le esondazioni si riducono in estensione, confermando il benefico effetto del manufatto. Nell'evento del 2005, il più gravoso fra i due esaminati, le aree di allagamento in presenza di cassa d'espansione sono più contenute rispetto il caso di



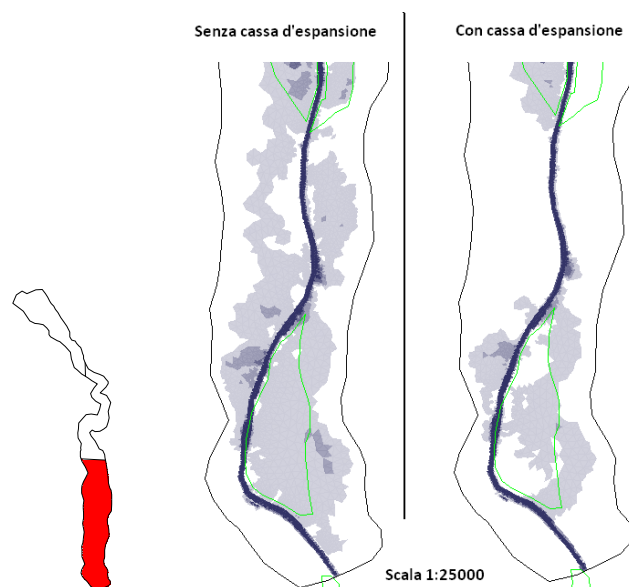
assenza di cassa d'espansione. Nella fig. 9 i 18 km di fiume studiato sono ripartiti in tre porzioni (iniziale, intermedio e finale), i poligoni dal bordo verde rappresentano le aree storiche allagate.



**Figura 9a.** Aree allagate nel tratto iniziale in assenza di cassa d'espansione e in sua presenza.



**Figura 9b.** Aree allagate nel tratto intermedio in assenza di cassa d'espansione e in sua presenza.



**Figura 9c.** Aree allagate nel tratto finale in assenza di cassa d'espansione e in sua presenza.

Relativamente all'evento del 2010, la portata al colmo si riduce da  $341 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $307 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tuttavia essendo l'evento meno gravoso rispetto al 2005, l'accumulo temporaneo di  $1.9 \text{ Mm}^3$  consente di diminuire significativamente l'estensione delle aree allagate.

#### 4 CONCLUSIONI

Nell'articolo si è studiato l'inserimento di un restringimento nella sezione trasversale di un corso d'acqua. Il rigurgito a monte del restringimento dà luogo ad un accumulo temporaneo della piena in una cassa d'espansione, che fa diminuire la portata al colmo della piena che prosegue verso valle. A tal fine si è usato un modello di simulazione idraulica bidimensionale per la propagazione di onde di piena basato sull'ipotesi diffusiva. Per riprodurre il rapido innalzamento della corrente a monte del restringimento, non riproducibile nell'ipotesi diffusiva, si è utilizzato un coefficiente di scabrezza equivalente limitatamente agli elementi del restringimento. La perdita di carico dovuta alla scabrezza equivalente è pari a quella che avviene durante il passaggio per lo stato critico nel restringimento e nel conseguente risalto idraulico.

La disponibilità di due idrogrammi di piena storici ha consentito, preliminarmente, di effettuare delle simulazioni, senza cassa d'espansione, per confrontare le aree storicamente allagate con quelle simulate. Questo confronto ha permesso di definire i valori delle scabrezze di Manning da attribuire all'alveo ed alle zone esterne all'alveo.

Fissato un idrogramma di piena storico in arrivo da monte, il modello bidimensionale ha simulato gli allagamenti nella cassa d'espansione ed ha fornito l'idrogramma di piena che prosegue verso valle. La diminuzione verso valle della portata al colmo ha permesso di stabilire che le aree inondabili, per l'inserimento della cassa d'espansione, sono inferiori a quelle storicamente allagate in assenza del manufatto di restringimento.

## BIBLIOGRAFIA

- Aricò, C., Nasello, C., Sinagra, M. & Tucciarelli, T. Inserimento di restringimenti e ponti in un modello diffusivo 2D di acque basse. *XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Palermo, 2010.
- Aricò, C., Nasello, C. & Tucciarelli, T. A Marching in space and time (MAST) solver of the shallow water equations. Part II: The 2D case. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(5), pp. 1253-1271.
- Aricò, C., Sinagra, M., Begnudelli L. & Tucciarelli, T. MAST-2D diffusive model for flood prediction on domains with triangular Delaunay unstructured meshes. *Advances in Water Resources* (2011), doi:10.1016/j.advwatres.2011.08.002.
- Aricò, C. & Tucciarelli, T. MAST solution of advection problems in irrotational flow fields, *Advances in Water Resources*, 2007,a, 30(3), pp. 665-685.
- Aricò, C. & Tucciarelli, T. A Marching in space and time (MAST) solver of the shallow water equations. Part I: The 1D case. *Advances in Water Resources*, 2007,b, 30(5), pp. 1236-1252.
- Bacchi, B. & Maione, U. Influenza di un volume di laminazione sulla distribuzione di probabilità dei colmi di piena, *L'Energia Elettrica*, n°10, 1984.
- Brath, A., Fiorentino, M. & Villani, P. Modelli matematici per la valutazione dei volumi di piena a frequenza assegnata, in *Valutazione delle piene in Puglia*, Fiorentino, M., Copertino, V.A. (eds.), Potenza, CNR-GNDICI, 1994.
- Guo, Y. Detention storage volume for small urban catchments, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 1999, 125(6), 380-382.
- Guo, Y. Hydrologic design of urban flood control detention ponds, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 2001, 6(6), 472-479.
- De Martino, G., De Paola, F., Fontana, N. & Giugni, M. Sul dimensionamento di casse di espansione in linea, *28° Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche*, Potenza, 2002.
- Tucciarelli, T. & Termini, D. Finite-element modelling of floodplain flows. *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, 2000, 126(6), pp. 416-424.