



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI FERRARA



# Valutazione del comportamento delle opere di bonifica idraulica e analisi di pericolosità per allagamento da cedimento arginale del Fiume Reno

**Marco Franchini**  
**Università degli Studi di Ferrara**

MODERNI SVILUPPI APPLICATIVI NEL CAMPO DELLA MODELLAZIONE IDRAULICA  
DEL RETICOLO DI BONIFICA  
Ferrara 18 Ottobre 2013

## Obiettivo

determinare l'estensione, le altezze e la velocità dell'acqua negli allagamenti nel bacino di Argenta dovuti a crisi arginali del vicino fiume Reno.

## Utilità

1) Acquisire informazioni per valutazioni di Protezione Civile e di diretta competenza per il Consorzio di Bonifica sul comportamento del sistema idraulico, costituito da canali, manufatti e impianti di sollevamento, sia nella fase di allagamento sia nella fase di prosciugamento.

2) Identificare l'appropriato livello di descrizione del terreno (ovvero cercare di capire fino a che punto spingere l'investimento per acquisire informazioni plano-altimetriche oltre il quale non vi è più un effettivo "guadagno" in termini di precisione nei risultati).

## Elementi della presentazione:

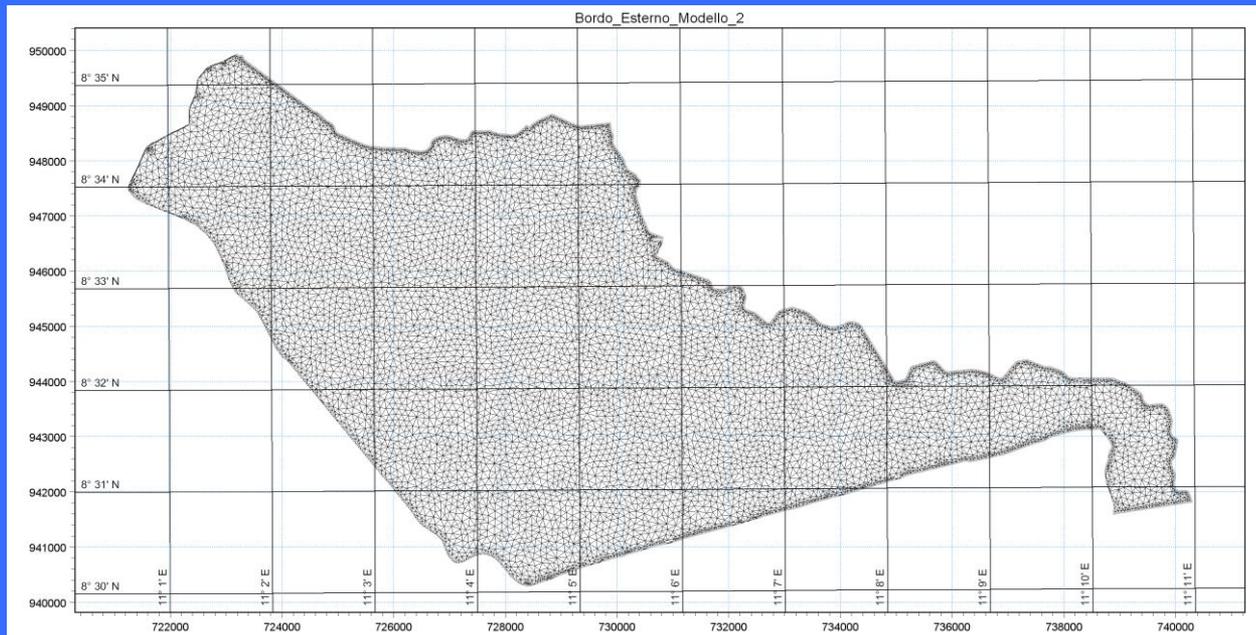
- i modelli numerici del terreno caratterizzati da crescenti livelli di dettaglio;
- l'identificazione dell'evento critico di piena nel fiume Reno assunto a base delle verifiche e sua caratterizzazione probabilistica.
- la modellazione idrodinamica monodimensionale dell'evento.
- la formazione della breccia arginale e la costruzione delle relative onde di breccia.
- la modellazione bidimensionale e relative mappe di allagamento e di pericolosità;
- l'analisi dell'influenza sui risultati del grado di dettaglio usato nella rappresentazione del suolo, delle infrastrutture e dei canali.

## Dominio di calcolo e mesh di rappresentazione

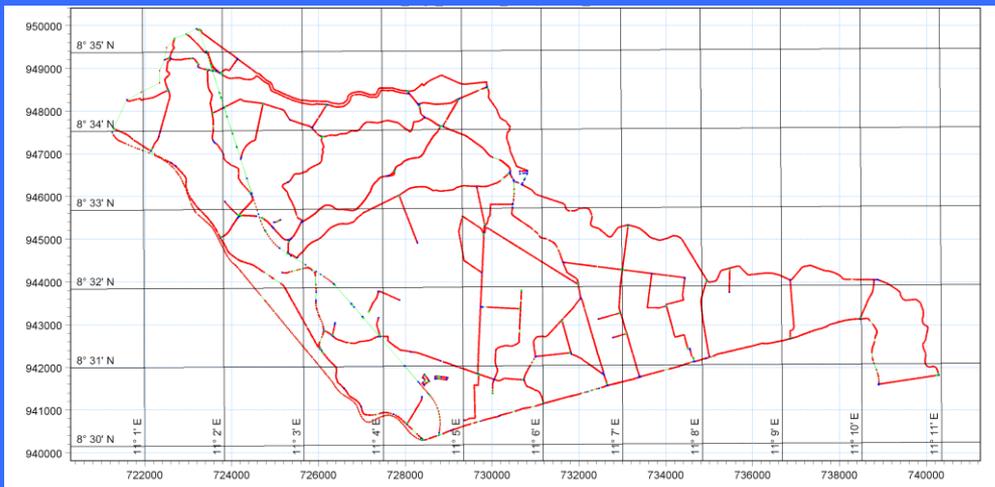
**Primo passo:** generazione mesh triangolari

(criteri: massima area ( $10.000 \text{ m}^2$ ), minimo angolo ammissibile tra i lati ( $26^\circ$ ), massimo numero di vertici presenti (100.000))

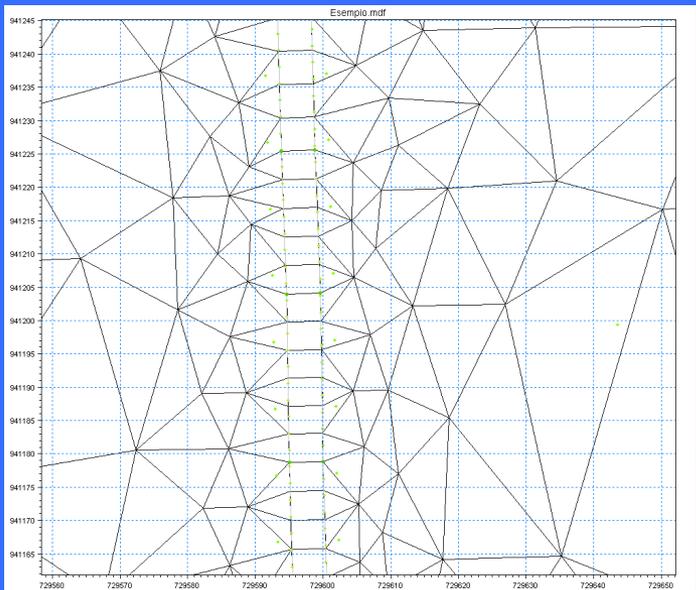
La mesh così generata è priva di informazioni di quota e la variabilità nel dominio di triangolazione è data dalla sola geometria del dominio di calcolo alla quale i triangoli devono adattarsi. Con i valori introdotti in questo studio si sono generati triangoli sostanzialmente equilateri con lati variabili da 100 a 150 metri.



Mesh-Generator  
presente nel  
pacchetto Mike-Zero

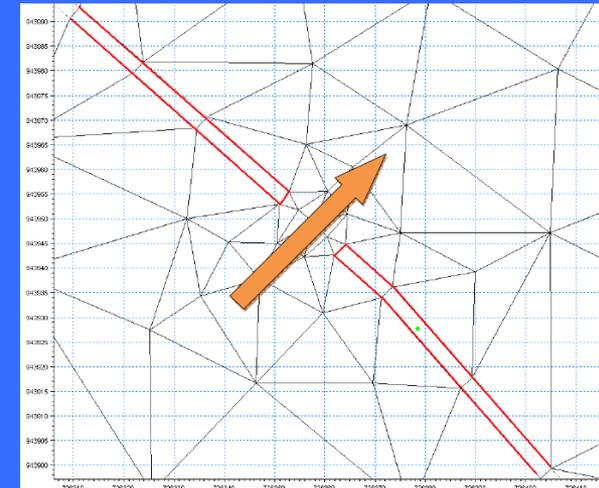


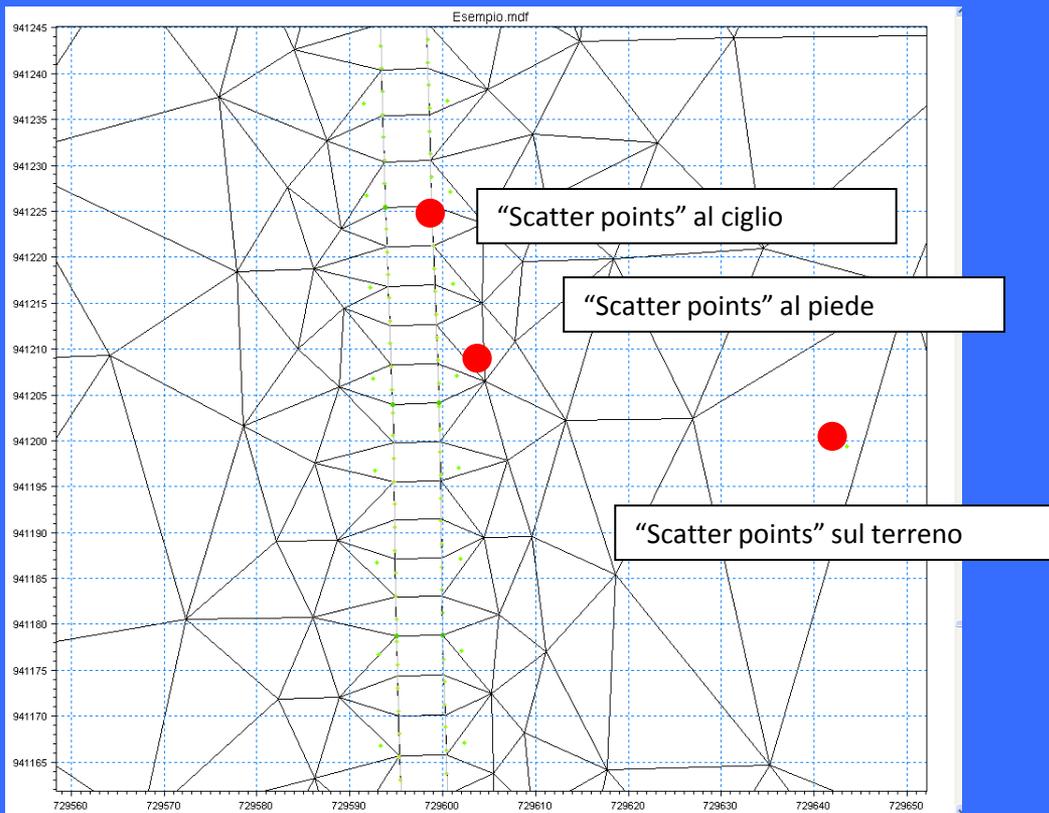
**Secondo passo:** introduzione planimetrica dei rilevati mediante due archi paralleli rappresentativi della larghezza del coronamento. Le due linee parallele che delimitano il coronamento del rilevato rappresentano di fatto i rispettivi cigli.



Queste due linee sono state chiuse alle estremità del rilevato stesso venendo così a formare un poligono chiuso. E' stata quindi imposta la formazione di elementi di forma rettangolare (parametro "maximum length stream" = 25 m) e il raccordo di questi vertici ai vertici delle maglie triangolari (descrittive del terreno)

Individuata la posizione del varco e la sua dimensione è stata introdotta nel poligono del coronamento del rilevato un'interruzione



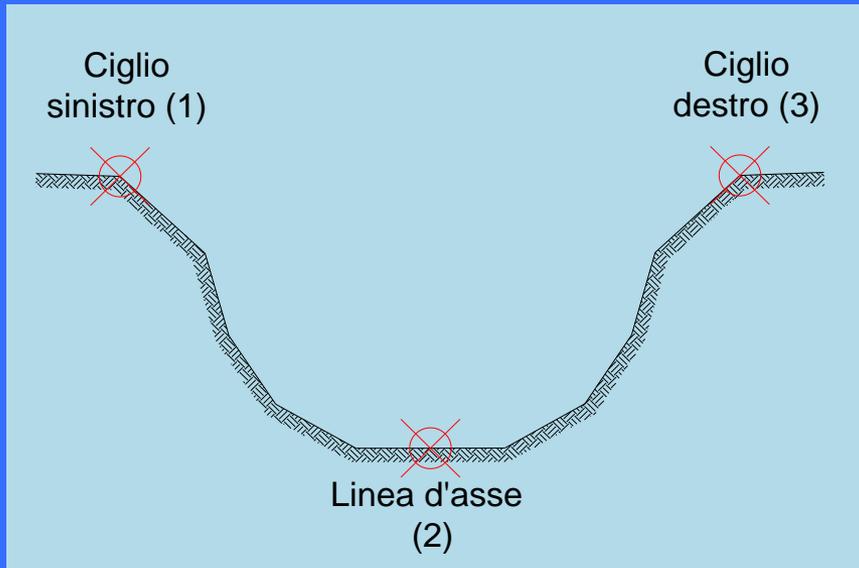


**Terzo passo:** informazioni altimetriche  
 Le informazioni altimetriche vengono inserite attraverso gli scatter points (caratterizzati da coordinate x,y,z).

- punti terreno uniformemente distribuiti ad una inter-distanza di 50 m;
- punti in corrispondenza dei cigli dei rilevati, con un'inter-distanza di 2.5 m;
- punti in corrispondenza dei piedi dei rilevati, con un'inter-distanza di 10 m;
- punti adiacenti ai varchi;

Modalità di acquisizione degli scatter points.

- cartografia esistente CTR 5000, corretta con informazioni sulla subsidenza, e consistente in circa 14000 punti georeferenziati e quotati.
- campagna di rilievo diretto con tecnica GPS : 115 giornate lavorative che hanno visto 780 ore di lavoro così suddivise: 59 giornate, per un totale di 400 ore di rilievi in campagna, e 56 giornate lavorative (380 ore) per le elaborazioni dei dati raccolti



**Quarto passo:** inserimento dei canali  
Il modello numerico del terreno è stato combinato con la rete di canali di bonifica. Questo ha reso possibile simulare contemporaneamente il movimento bidimensionale dell'acqua sul terreno (conseguente alla crisi arginale) e lo stato di moto monodimensionale nei canali della rete di bonifica.

La modellazione monodimensionale dei canali richiede la conoscenza del tracciato planimetrico del corso d'acqua e della geometria delle sezioni trasversali. In figura vengono evidenziati i punti principali 1, 2, 3 descrittivi di tali sezioni.

Il collegamento tra i modelli mono e bi-dimensionale avviene in corrispondenza dei punti (1) e (3) mediante un funzionamento a stramazzo tra l'alveo del canale e il territorio circostante.

L'interazione tra i due modelli avviene in due possibili situazioni:

- in fase di esondazione si ha una fuoriuscita di acqua dal canale stesso verso le celle del modello territoriale ad esso collegate, innescando le elaborazioni bidimensionali;
- in fase di rientro: qualora il livello nelle celle superi la quota dei cigli (1 o 3) l'acqua entra nel canale innescando i calcoli monodimensionali.

## I modelli del terreno utilizzati

**MOD 0A:** modello basato solo su informazioni terreno (non ci sono elementi in rilievo) ricavate dalla CTR5000 + modello dei canali;

**MOD 0B:** come il precedente ma senza il modello dei canali;

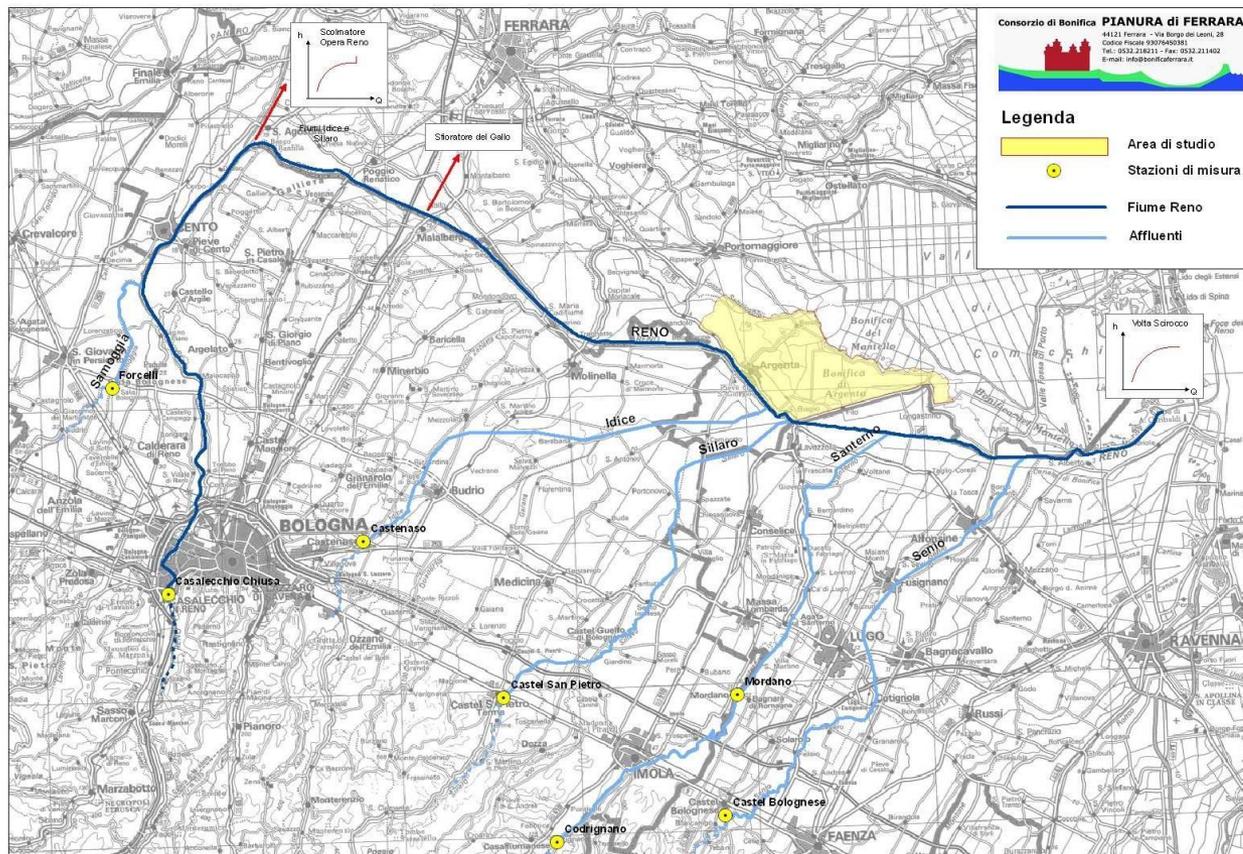
**MOD 1A:** modello realizzato sulla base delle informazioni altimetriche ricavate dalla CTR5000 relativamente ai punti terreno, integrato dagli elementi in rilievo acquisiti tramite rilievo GPS + modello dei canali;

**MOD 1B:** come il precedente ma senza il modello dei canali;

**MOD 2A:** modello ottenuto per intero (terreno e rilievi) dai rilievi realizzati con il GPS + modello dei canali;

**MOD 2B:** come il precedente ma senza il modello dei canali.

## Identificazione dello scenario di piena di riferimento



Le stazioni utilizzate per la definizione dell'evento critico di riferimento sono: Casalecchio alla Chiusa (Reno), Forcelli (Samoggia), Castenaso (Idice), Castel San Pietro (Sillaro), Codrignano e Mordano (Santerno), Castel Bolognese (Senio).

Tratto di valle: Casalecchio – Volta Scirocco: 120 km

Per tutte le stazioni idrometriche, serie temporali di livello disponibili per il periodo 1986-2008, campionate a passo 30 minuti (per la stazione di Mordano i dati sono disponibili a partire dall'anno 1989)

Stazioni con scala di deflusso: Castenaso (Idice), Mordano (Santerno), Casalecchio alla chiusa (Reno)

## Identificazione dello scenario di piena di riferimento

E' stato identificato per ogni anno l'evento che ha dato luogo al "*massimo apporto complessivo*" al fiume Reno, dove per "apporto complessivo" si intende la somma dei picchi di livello, relativi al medesimo evento, registrati nelle quattro stazioni in destra Reno.

Per ciascun evento si è quindi passati dai livelli alle portate.

Nelle stazioni dotate di scala di deflusso, i livelli sono stati trasformati in portata direttamente, ottenendo così le corrispondenti onde di piena.

Nelle stazioni non dotate di scala di deflusso l'onda di piena è stata costruita in base ai seguenti passi:

- identificazione del tempo di ritorno relativo al livello massimo osservato;
- Identificazione della portata  $Q^*$  di ugual tempo di ritorno mediante una tecnica di regionalizzazione basata sul metodo della portata indice;
- costruzione dell'onda di piena avente il picco pari a  $Q^*$ , forma gamma e portate medie su varie durate dedotte dalla curva regionale di riduzione dei volumi;

## Identificazione dello scenario di piena di riferimento

Le onde così ricavate sono state collocate temporalmente all'interno dell'evento di piena nel suo complesso. Dalle serie temporali dei livelli a disposizione, sono stati ricavati gli istanti propri dei picchi di piena, mentre dalle schede descrittive delle stazioni di misura, si possono ricavare le distanze di esse dalla confluenza in Reno. Assumendo una celerità pari ad  $1,5 \text{ m/s}$ , si è ipotizzata una traslazione puramente cinematica delle onde. In questo modo è stato determinato l'assetto temporale dei picchi e, di conseguenza, delle intere onde di piena in corrispondenza della confluenza in Reno. Le onde ricostruite alle stazioni di Casalecchio alla Chiusa e Forcelli sono le uniche che non sono state traslate in quanto rappresentate all'interno del modello idraulico del fiume Reno.

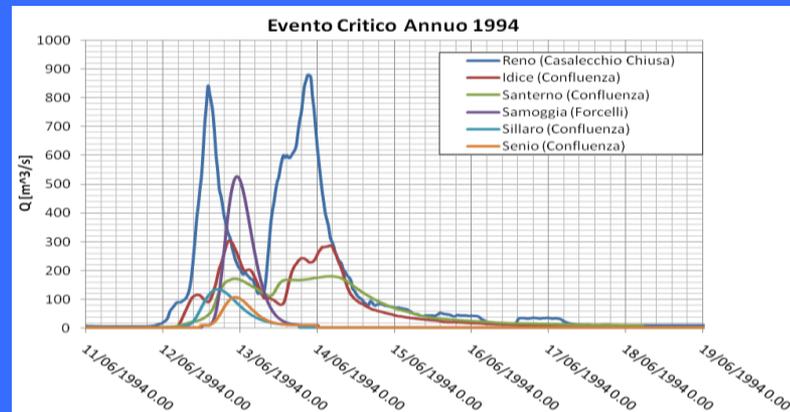
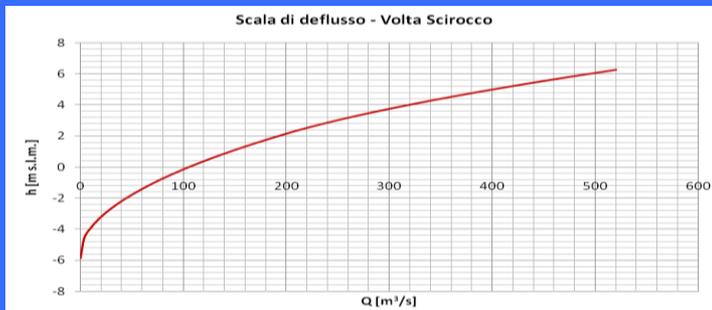
## Modellazione idrodinamica degli eventi di piena massimi annui

La modellazione idrodinamica monodimensionale del sistema Reno-affluenti è stata svolta tramite l'utilizzo del software Mike11-DHI.

- Onde di monte (Casalecchio sul Reno e Forcelli sul Samoggio);
- Onde laterali in destra (Idice, Sillaro, Santerno e Senio)
- Altre condizioni al contorno: scala di deflusso scolmatore di Reno (Cavo Napoleonico), sfioratore laterale del Gallo, scala di deflusso Volta Scirocco.
- Rilievo topografico delle sezioni trasversali relativo agli anni 1995, 1997, 2004.

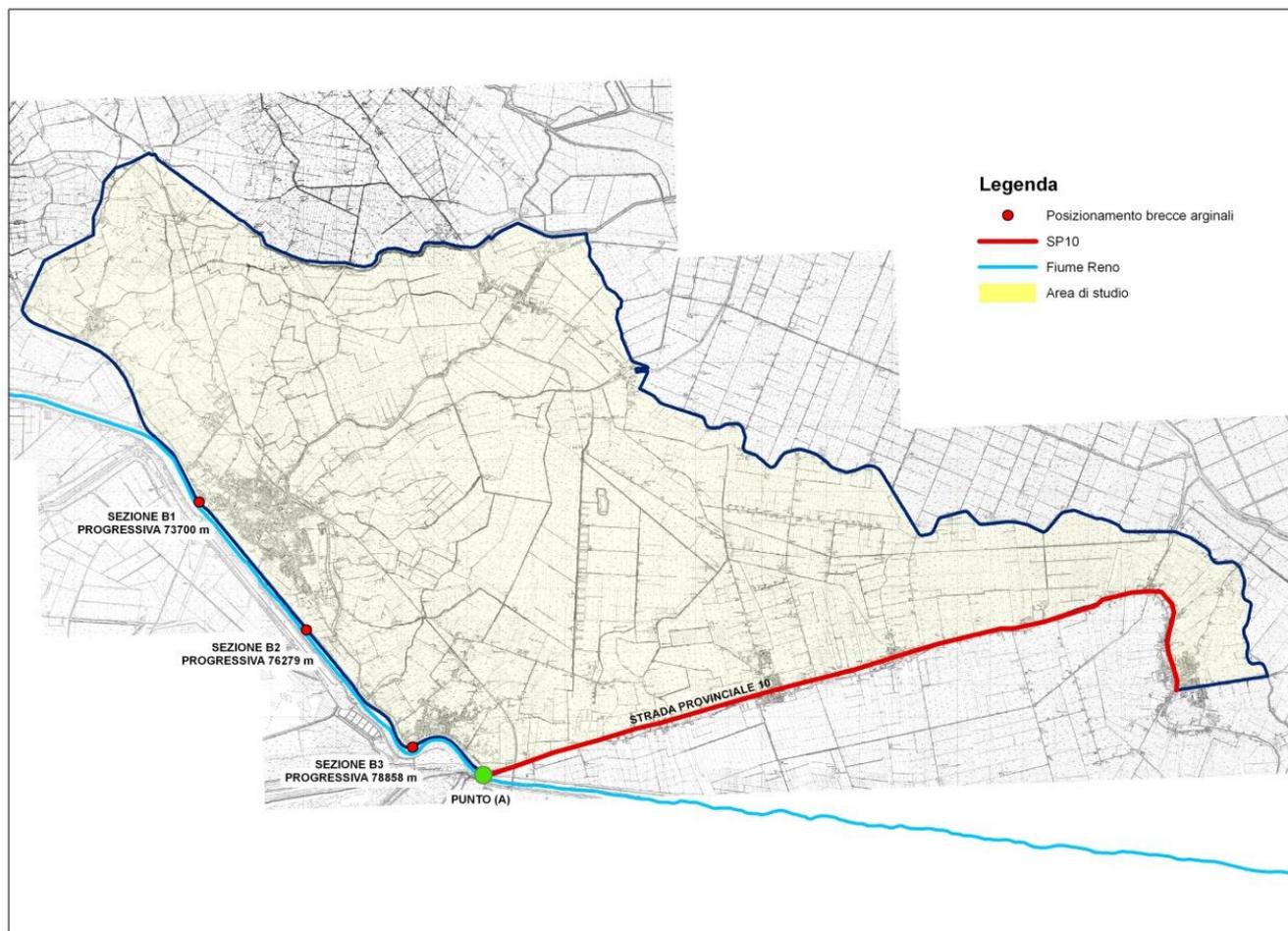


Sfiatore del Gallo



## Modellazione idrodinamica degli eventi di piena massimi annui

Sono stati simulati 28 scenari di piena (anni 1981-2008) ciascuno costituito dall'evento di *massimo apporto annuo*



L'evento selezionato è il più gravoso per la combinazione delle piene nei corsi d'acqua affluenti nel tratto terminale.

## Modellazione idrodinamica degli eventi di piena massimi annui

Lo scenario di piena selezionato è stato caratterizzato in termini di frequenza mediante  $T_{and}$  e  $T_{or}$ :

$$T_{and} = \frac{1}{1 - \left\{ \sum_i^{n_{staz}} F_{X_i}(e_i) - \sum_{i < j} \sum_{j < n_{staz}} F_{X_i X_j}(e_i e_j) + \sum_{i < j} \sum_{j < k} \sum_{k < n_{staz}} F_{X_i X_j X_k}(e_i e_j e_k) - \sum_{i < j} \sum_{j < k} \sum_{k < x} \sum_{x < n_{staz}} F_{X_i X_j X_k X_x}(e_i e_j e_k e_x) \dots \right.}$$

$$\left. \dots + \sum_{i < j} \sum_{j < k} \sum_{k < x} \sum_{x < y} \sum_{y < n_{staz}} F_{X_i X_j X_k X_x X_y}(e_i e_j e_k e_x e_y) - F_{X_i X_j X_k X_x X_y X_z}(e_i e_j e_k e_x e_y e_z) \right\} \cong 55 \text{ anni}$$

$$T_{or} = \frac{1}{P} = \frac{1}{1 - F_{X_i X_j X_k X_x X_y X_z}(e_i e_j e_k e_x e_y e_z)} \cong 2 \text{ anni}$$

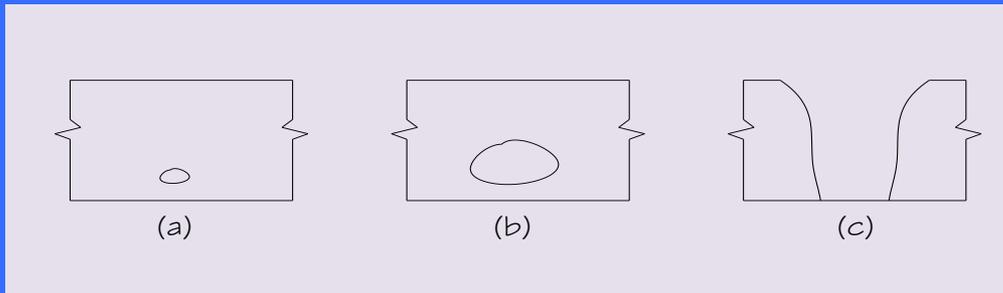
$$F_{X_i X_j}(e_i = H_{cr,i}^{anno}, e_j = H_{cr,j}^{anno}) = \frac{n_{ei,ej} - 0.44}{N + 0.12}, \quad n_{ei,ej}: \text{ numero di coppie di osservazioni in cui } H_{\max,i} \leq H_{cr,i}^{anno} \text{ e } H_{\max,j} \leq H_{cr,j}^{anno}$$

$$C_\theta(u_1, u_2, \dots, u_n) = \exp \left\{ - \left[ (-\ln u_1)^\theta + (-\ln u_2)^\theta \dots + (-\ln u_n)^\theta \right]^{1/\theta} \right\}$$

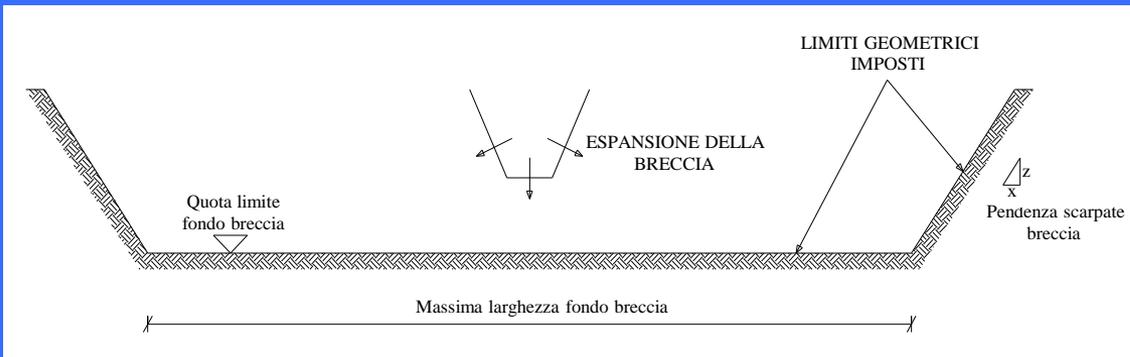
$u_i, i = 1, 2, \dots, n$       probabilità marginale delle singole variabili  $X_i$

## Formazione della breccia arginale

**Piping (formazione di un tubo):** percorso preferenziale all'interno del corpo arginale. Si innesca in conseguenza di un perdurante innalzamento dei livelli idrici all'interno di un corso d'acqua e in presenza di elevate caratteristiche di permeabilità dei materiali costituenti il rilevato arginale e/o di ridotta sezione trasversale dello stesso e/o di tane o ceppaie.



L'allargamento della breccia viene considerato proporzionale all'abbassamento del fondo



Per la simulazione occorre precisare la quota di formazione del piping e la quota finale della breccia.

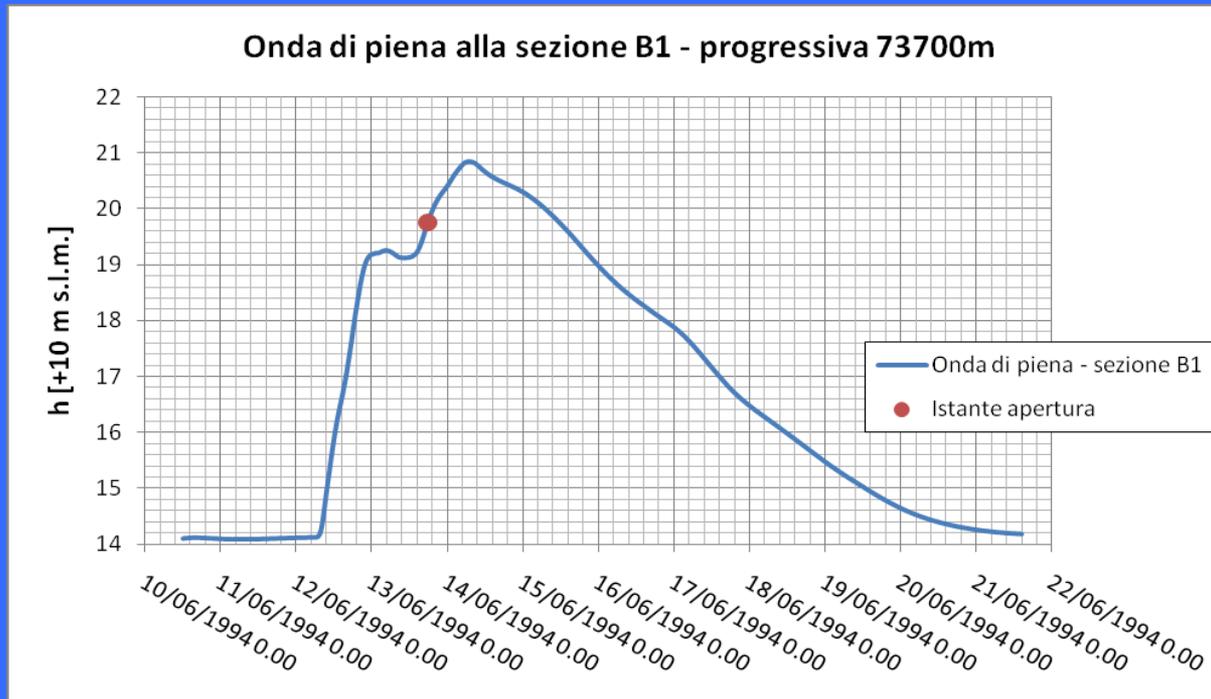
## Formazione della breccia arginale

Il valore relativo alla quota di formazione del sifone, così come il valore limite della quota finale di sviluppo della breccia, contengono una componente di variabilità. Vista l'incertezza nell'attribuzione di queste grandezze, si è scelto di operare con un approccio di tipo statistico. Sono state generate delle coppie di valori relative alla quota di formazione del pipe e al livello finale di fondo breccia. La generazione è avvenuta riproducendo 100 valori casuali appartenenti ad una distribuzione di probabilità uniforme definita su di un prefissato intervallo.

Breccia	Punto di Breccia [m]	Fondo Breccia [m]	Innesco Piping [m]
B1	73700	12.0	12.0*
		15.0	16.0
B2	76279	14.8	14.8*
		17.8	18.8
B3	78858	14.7	14.7*
		17.7	18.7

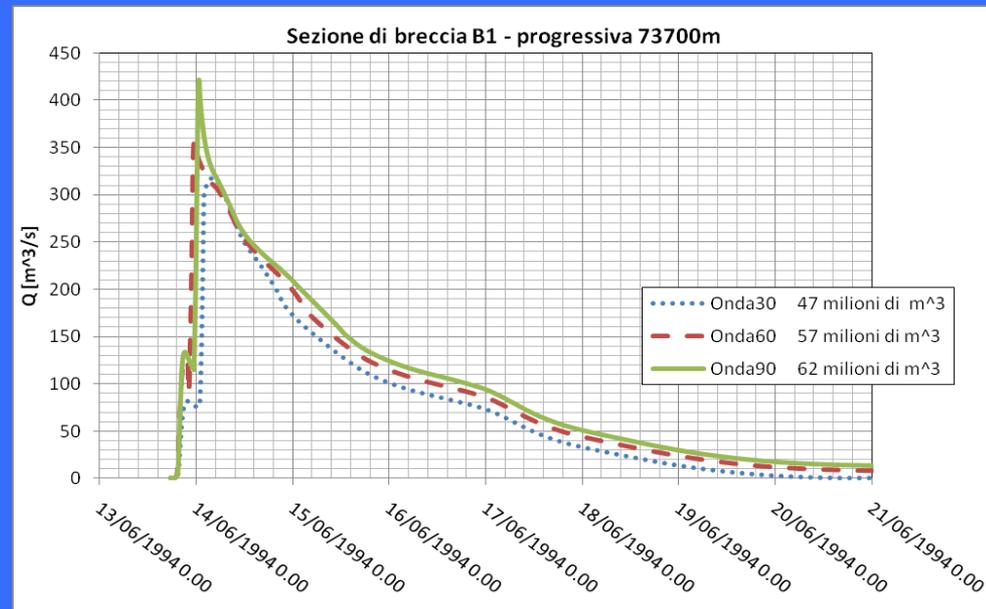
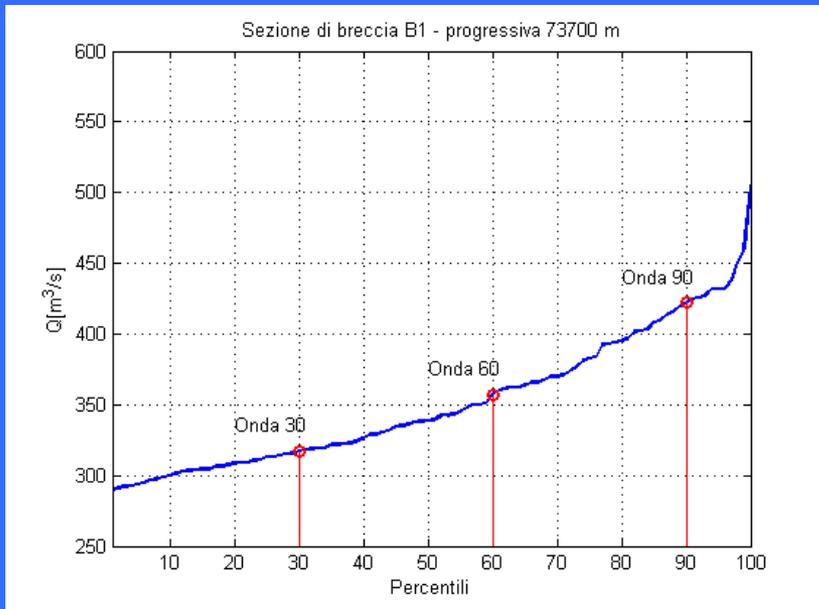
## Formazione della breccia arginale

**Istante di innesco del sifonamento:** nel corso d'acqua si raggiunge il 95% del livello massimo di piena (in fase crescente).



## Onde di breccia

Dalle simulazioni idrodinamiche effettuate per ciascuna coppia di valori (quota innesco sifone / quota fondo finale breccia) risultano cento onde per ogni punto o sezione di crisi (in totale 300 onde). Tali onde, in ogni punto di breccia, sono state ordinate in base al valore crescente di portata al colmo. Per le simulazioni di allagamento territoriale, si sono scelte, per ogni punto di crisi, la trentesima, la sessantesima e la novantesima onda (ovvero il 30°, 60° e il 90° percentile), in funzione del valore di portata al colmo.

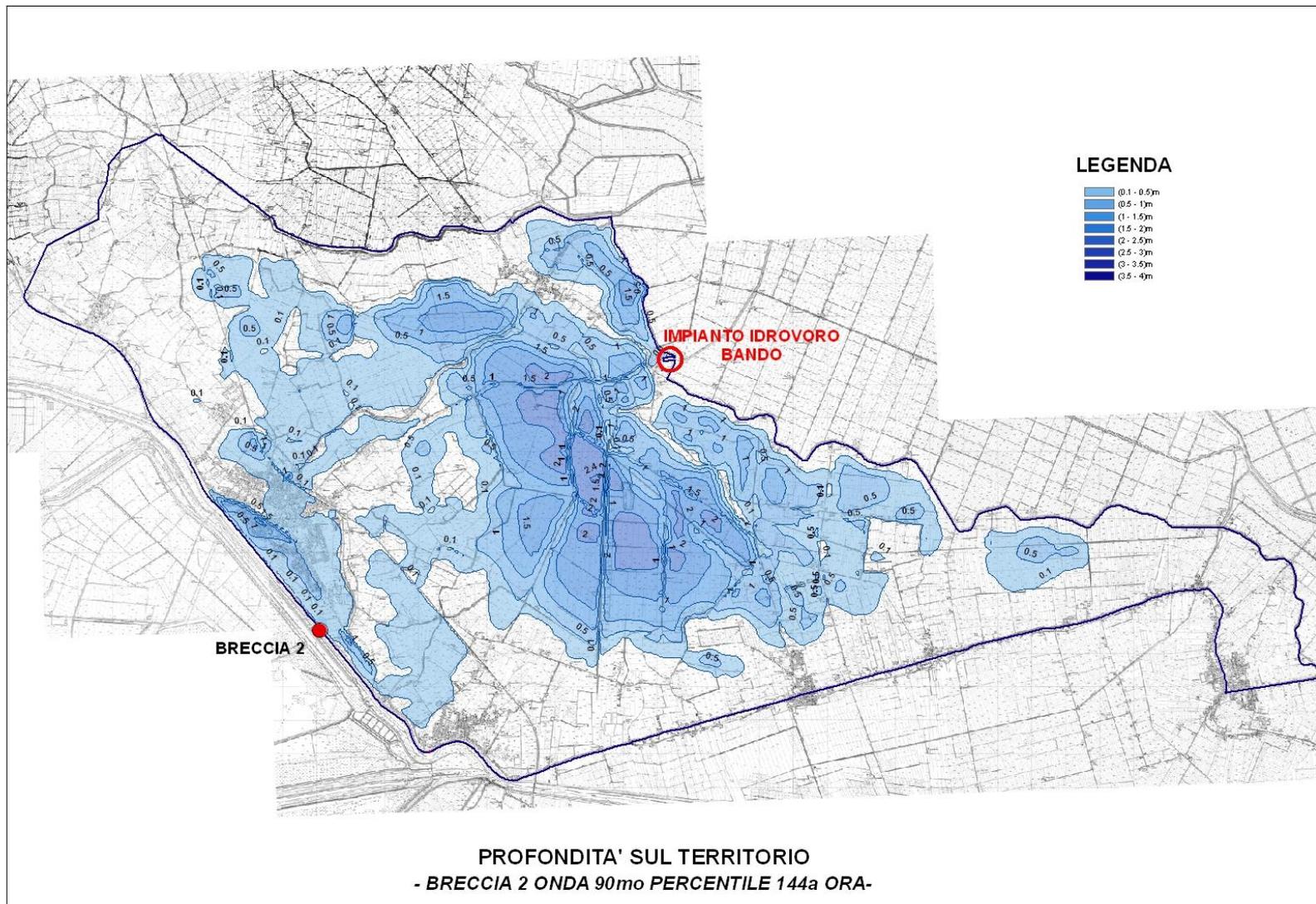


## Simulazioni: mappe di allagamento

Per la costruzione delle singole mappe di allagamento e delle mappe di sintesi si è fatto uso del modello territoriale MOD 2A, modello ottenuto per intero (terreno e rilevati) dai rilievi realizzati con il sistema GPS, “accoppiato” al modello numerico dei canali.

Ai fini della restituzione grafica delle simulazioni, e per un confronto sistematico fra di esse, si è deciso di riportare mediante interpolazione lineare i risultati del DHI Mike Flood, ad un griglia di punti equispaziati a distanza 50m.

# Simulazioni: mappe di allagamento



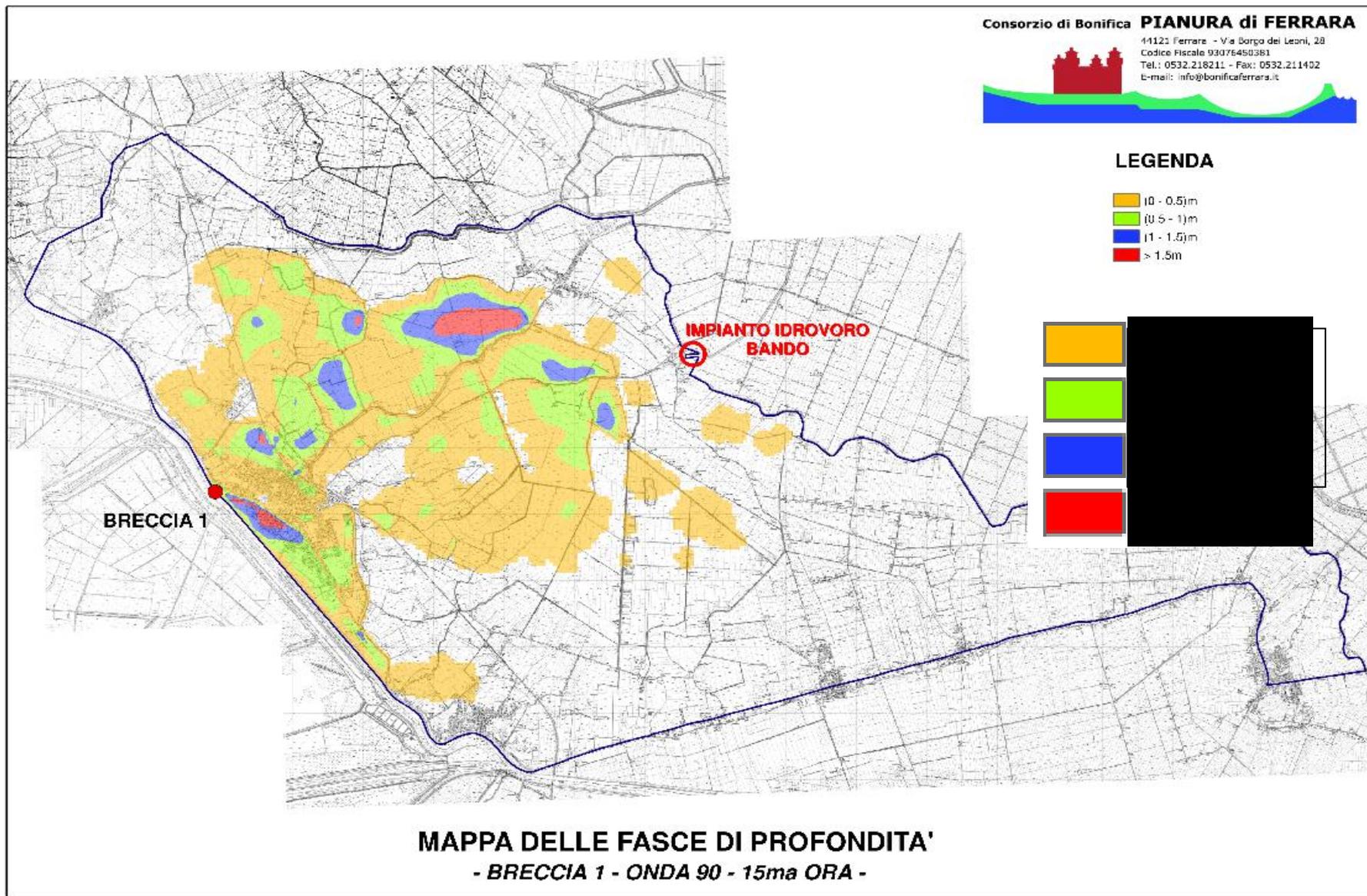
## Ulteriori elaborazioni: mappe di sintesi

**Mappe di massima profondità.** Un primo tipo di mappa di sintesi è stato costruito sulla base dell'inviluppo delle massime profondità. Sono state così costruite 9 mappe, una per ogni simulazione di allagamento effettuata, ciascuna rappresentante l'inviluppo delle massime profondità calcolate sul territorio.

**Mappe delle fasce di profondità.** Un secondo tipo di mappa di sintesi è quello in cui vengono riportate le aree che in un certo istante si trovano allagate con un tirante il cui valore ricade all'interno di 4 fasce caratterizzate da condizioni crescenti di difficoltà di movimento e pericolosità (0-0.5)m, (0.5-1)m, (1-1.5)m, (>1.5)m. In questo caso sono state costruite 72 mappe, 24 per ogni breccia, che descrivono l'evoluzione delle fasce di profondità per le 3 onde di assegnato percentile a passo 3 ore nelle prime 24.

# Ulteriori elaborazioni: mappe di sintesi

## Esempio di fasce di ugual profondità



## Ulteriori elaborazioni: mappe di sintesi

### Mappe di pericolosità idraulica

Per la costruzione della mappa di pericolosità idraulica si è impiegata la metodologia che prende in considerazione come parametri di calcolo, la profondità d'acqua e la velocità orizzontale della corrente sui singoli punti della griglia.

Si è definito per l'  $i$ -mo punto della griglia, in riferimento al  $j$ -mo scenario, un indice di pericolosità  $P_{i,j}$ , variabile fra 0 e 1, funzione di un indicatore associato ai massimi tiranti idrici e di un indicatore associato alle massime velocità raggiunte, ovvero:

$$P_{i,j} = f(I(h_{i,j}), I(v_{i,j}))$$

$$I(h_{i,j}) = \frac{h_{i,j}}{H_j}$$

dove  $h_{i,j}$  rappresenta il massimo tirante idrico raggiunto sulla cella  $i$  nello scenario  $j$ , mentre  $H_j$  rappresenta il massimo dei tiranti idrici massimi raggiunti in tutte le celle nello scenario  $j$

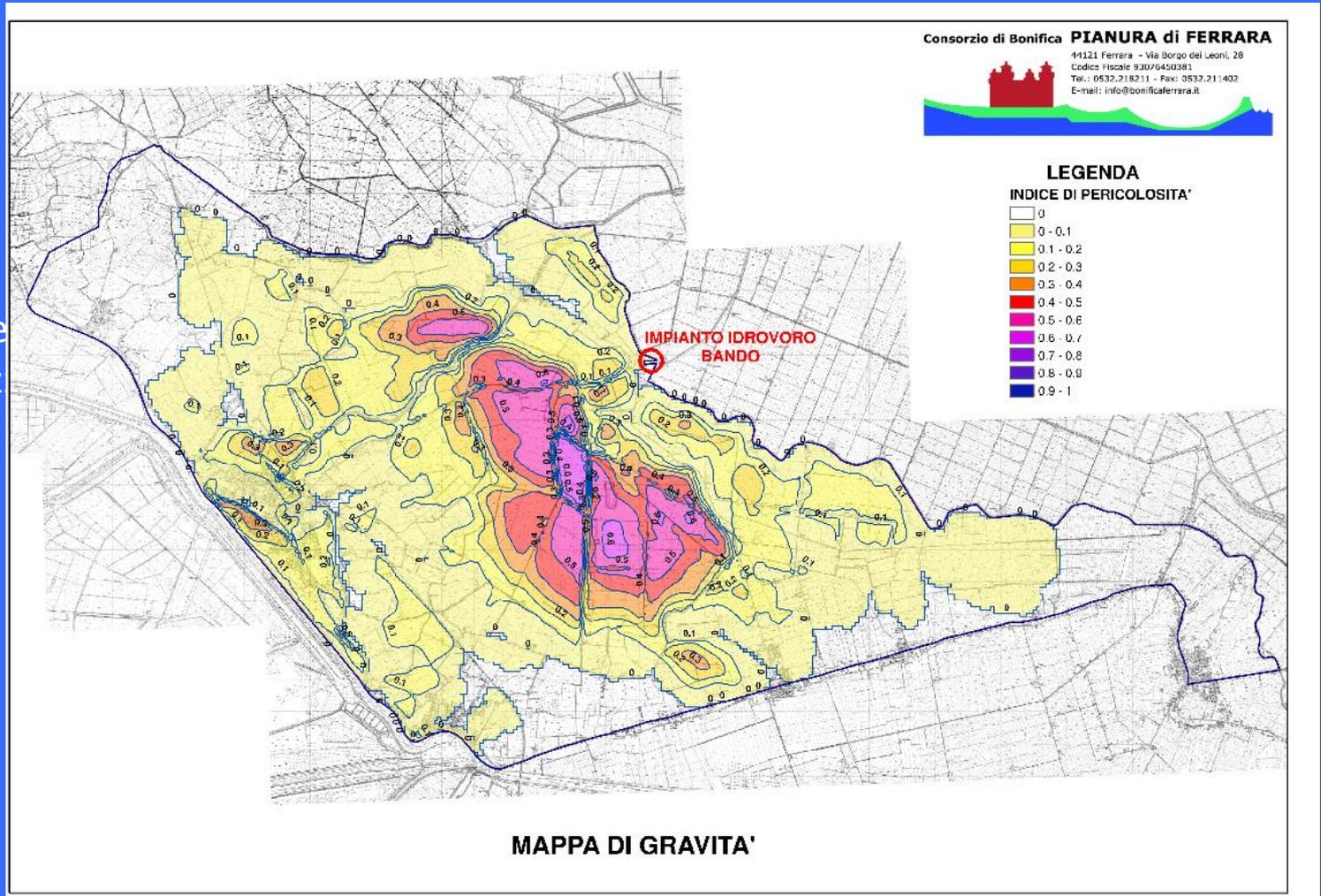
$$I(v_{i,j}) = \frac{v_{i,j}}{V_j}$$

dove  $v_{i,j}$  rappresenta la massima velocità raggiunta sulla cella  $i$  nello scenario  $j$ , mentre  $V_j$  rappresenta il valore massimo delle massime velocità raggiunte in tutte le celle nello scenario  $j$ .

## Ulteriori elaborazioni: mappe di sintesi

### Mappe di pericolosità idraulica

L'indice di pericolosità nel generico *i*-mo punto della griglia a fronte di tutti i possibili scenari viene stimato mediante una media pesata:



dove il pe  
caratteriz

ia che

## Comportamento impianto idrovoro di Bando in presenza di crisi arginale

Dalle analisi condotte risulta che, per gli eventi considerati nelle simulazioni, l'impianto di Bando non è interessato da allagamenti che coinvolgano la sala macchine, dove sono collocati le idrovore ed i quadri elettrici di comando. Tale aspetto porta a ritenere che le pompe possano, in linea generale, mantenere la loro funzionalità durante gli eventi di crisi.



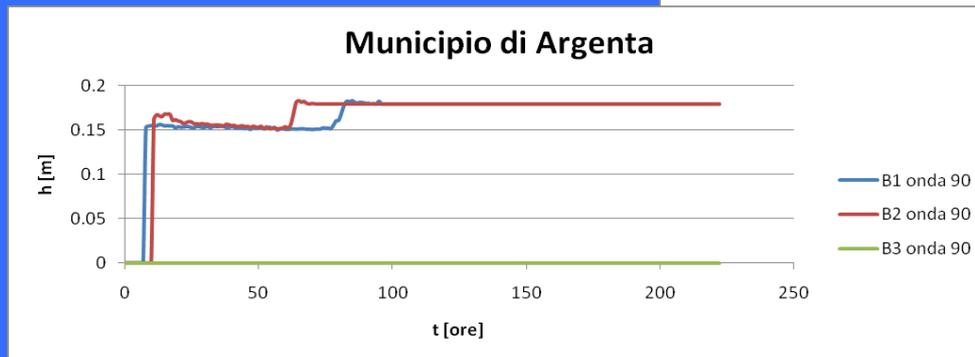
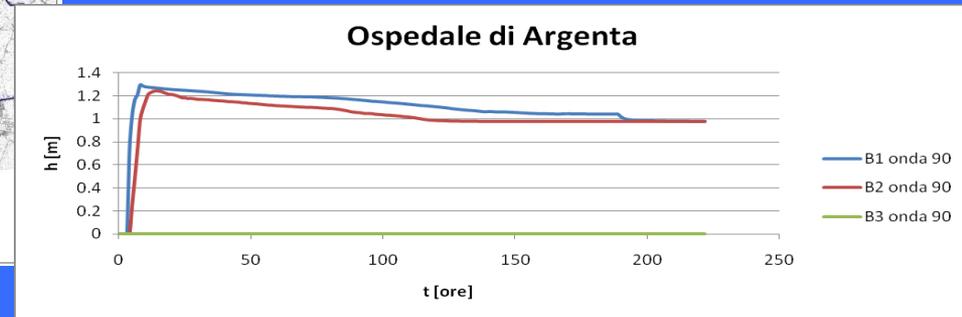
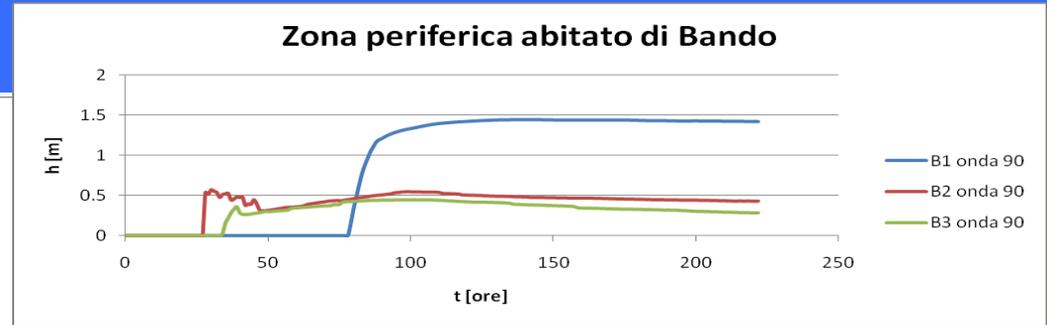
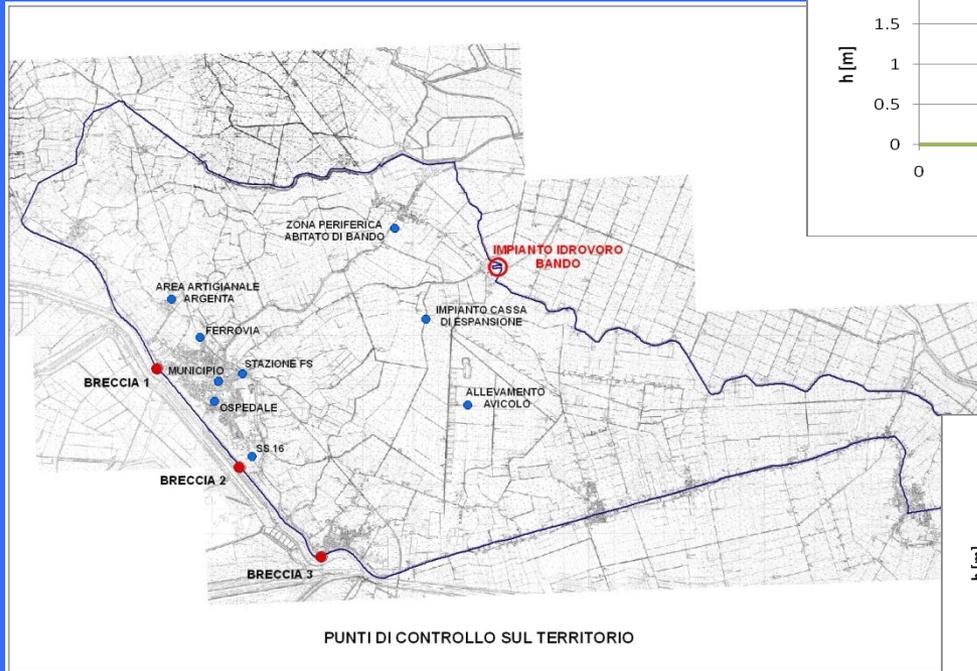
Variazione nel tempo del livello idrico nel collettore principale della bonifica di Argenta durante l'evento di allagamento più gravoso.

## Comportamento impianto idroforo di Bando in presenza di crisi arginale: Impianto idroforo ausiliario

Per questo impianto l'inondazione simulata determina dei tiranti che sommergono il piano di installazione delle pompe. Rimane comunque salvaguardata la parte elettrica, rappresentata dai motori, che sono posizionati a quote che possono essere ritenute sicure.



# Aspetti connessi con la protezione civile e la pianificazione territoriale



## Sensibilità delle simulazioni alla qualità del rilievo

**MOD 0:** modello realizzato sulle base delle sole informazioni riguardanti il terreno (non ci sono elementi in rilievo) ricavate dalla Carta Tecnica Regionale CTR5000 della Regione Emilia Romagna tenendo conto dell'effetto della subsidenza;

**MOD 1:** modello realizzato sulla base delle informazioni altimetriche ricavate dalla CTR5000 + subsidenza relativamente ai punti terreno integrato dalle informazioni plano-altimetriche dei rilevati stradali ed arginali acquisite tramite rilievo diretto GPS;

**MOD 2:** modello ottenuto per intero (terreno e rilevati) dai rilievi realizzati con il GPS.

**IMPORTANTE:** Le mesh di rappresentazione del terreno da un punto di vista della dimensione planimetrica sono le stesse in tutti e tre i modelli; ciò che cambia è l'informazione plano-altimetrica utilizzata per quotare i vertici delle mesh.

**N.B. MOD 0a, 1a, 2a** si intendono i modelli 0,1,2 **con** l'introduzione dei canali, mentre con **MOD 0b, 1b, 2b** si intendono i modelli 0,1,2 **senza** l'introduzione dei canali

**N.B.** MOD 2 (a o b a seconda dei casi), derivante dal rilievo più dettagliato e aggiornato possibile del terreno, degli ostacoli lineari e della rete di bonifica, è stato preso come riferimento per il confronto.

## Sensibilità delle simulazioni alla qualità del rilievo

La caratterizzazione della sensibilità della simulazione idraulica alla rappresentazione del territorio è stata svolta per meglio capire il rapporto fra i costi e i benefici connessi ai diversi gradi di precisione con cui può essere trattata l'informazione territoriale di base.

**E' infatti evidente che a una maggiore precisione corrisponde un costo crescente.**

MODELLO	RILIEVO TERRENO (€)	RILIEVO OSTACOLI LINEARI (€)	RILIEVO CANALI (€)	PROCESSAMENTO DATI (€)	TOTALE (€)
MOD 0A	Disponibile da CTR	Non necessario	21000	13000	34000
MOD 0B	Disponibile da CTR	Non necessario	Non necessario	2000	2000
MOD 1A	Disponibile da CTR	6500	21000	19500	47000
MOD 1B	Disponibile da CTR	6500	Non necessario	6500	13000
MOD 2A	38000	6500	21000	32500	98000
MOD 2B	38000	6500	Non necessario	19500	64000

## Sensibilità delle simulazioni alla qualità del rilievo

Il confronto dei risultati delle varie simulazioni condotte con diverso grado di precisione del modello territoriale è stato fatto utilizzando un particolare indice detto Indice Sintetico di Confronto, ISC:

$$ISC(t) = \frac{A_{ref}(t) \cap A_{mod}(t)}{A_{ref}(t) \cup A_{mod}(t)}$$

$A_{ref}(t)$  area allagata modello di riferimento  
(MOD 2: a o b a seconda dei casi)

$A_{mod}(t)$  area allagata modello di confronto  
(MOD 0 o MOD 1: a o b a seconda dei casi)

Al numeratore viene quindi espressa l'area allagata in **comune** tra il modello 2 e i modelli in esame, mentre al denominatore compare l'area allagata **unione** tra i modelli. Il comportamento dei modelli di confronto risulta tanto più simile al modello 2, quanto più l'ISC tende all'unità.

## CONCLUSIONI (1/3)

- 1) l'evento di piena preso a riferimento è quello manifestatosi nell'anno 1994 correlabile ad un tempo di ritorno "combinato" di 50-60 anni circa. L'evento in sé non è particolarmente gravoso: questa scelta è stata fatta per sottolineare come le condizioni di allagamento da crisi arginale possano avvenire ed essere estremamente estese anche a fronte di condizioni di deflusso nel fiume Reno non particolarmente eccezionali;
- 2) crisi arginali per "piping". La possibilità del fenomeno di "piping" è stata presa in considerazione in quanto il continuo succedersi di piene, di morbide e di magre nell'alveo del fiume Reno porta ad assestamenti nel corpo arginale il quale, anche per la presenza di nutrie, può risultare soggetto alla formazione di vuoti interni non facilmente monitorabili che costituiscono però il fattore scatenante del processo di sifonamento.



## CONCLUSIONI (2/3)

- 1) Il pericolo di allagamento interessa la pressoché totalità del bacino compreso l'abitato di Argenta;
- 2) nelle aree più depresse i tiranti d'acqua raggiungono valori di 2,5 – 3 m;
- 3) la velocità di propagazione dell'acqua rimane ridotta in tutte le fasi dell'allagamento con tempi di alcuni giorni per il raggiungimento delle massime profondità;
- 4) le opere idrauliche di bonifica (canali e manufatti), proprio in ragione delle basse velocità non sono soggette ad impatti violenti e quindi distruttivi con le masse d'acqua conseguenti alla crisi arginale; ci si deve però attendere la messa fuori uso di tali opere in conseguenza dei materiali raccolti e trasportati dall'acqua;
- 5) per l'allontanamento delle acque l'idrovora di Bando deve funzionare a pieno regime ininterrottamente fino ad un massimo di circa 38 giorni con eccezionale impegno delle apparecchiature elettromeccaniche **(problemi di fornitura elettrica)**.



## CONCLUSIONI (3/3)

### Sensibilità al rilievo

Per una più corretta riproduzione della dinamica dell'allagamento occorre rappresentare correttamente, in ordine di importanza:

- la presenza di ostacoli lineari e dei relativi varchi;
- la rete dei canali di bonifica;
- l'altimetria del territorio

Grazie  
per  
l'attenzione