



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, DELL'AMBIENTE,
DEL TERRITORIO E ARCHITETTURA (DICATEA)

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

***MODELLAZIONE IDRODINAMICA BIDIMENSIONALE DEL FIUME PO
NEL TRATTO PROSPICIENTE LA GOLENA CHIUSA DI GHIAROLE***

***2D HYDRODYNAMIC MODELING OF THE PO RIVER CLOSE TO THE
GHIAROLE FLOOD-STORAGE AREA***

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. PAOLO MIGNOSA

Correlatori:

Prof.ssa Ing. FRANCESCA AURELI

Ing. RENATO VACONDIO

Ing. DAVIDE GRAZIANI

Tesi di laurea di:

FRANCESCO CHIARI

Matricola: 255125

Anno Accademico 2015-2016

INDICE:

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUZIONE | 5 |
| 1.1 Obiettivo dello studio | 5 |
| 1.2 Descrizione dell'area oggetto di interesse e cenni storici | 6 |
| 1.3 Individuazione del dominio di calcolo..... | 8 |
| 1.4 Individuazione della pendenza del tratto di Po di interesse | 9 |
| 2. MODELLO DI CALCOLO | 12 |
| 2.1 Equazioni del moto vario 1D..... | 13 |
| 2.1.1 Equazione di continuità..... | 13 |
| 2.1.2 Equazione di bilancio della quantità di moto..... | 14 |
| 2.2 Equazioni del moto vario 2D..... | 16 |
| 3. DESCRIZIONE DATI DI INPUT | 20 |
| 3.1 Batimetria | 20 |
| 3.1.1 Validazione del rilievo a disposizione | 20 |
| 3.1.2 Validazione della batimetria a 8 metri..... | 30 |
| 3.1.3 Ripresa dei coronamenti arginali | 40 |
| 3.1.4 Rilievo dell'argine consortile..... | 42 |
| 3.1.5 Batimetria utilizzata nel presente studio | 49 |
| 3.2 Scabrezza | 50 |
| 3.2.1 Espressione del coefficiente di scabrezza..... | 50 |
| 3.2.2 Scabrezza utilizzata nel presente studio | 51 |
| 3.3 Condizioni iniziali di livello..... | 52 |
| 3.3.1 Il file .INH utilizzato nel presente studio | 52 |
| 3.4 Condizioni iniziali di portata specifica..... | 53 |
| 3.4.1 I file .VHX e .VHY utilizzati nel presente studio | 53 |
| 3.5 Condizioni al contorno | 54 |
| 3.5.1 Struttura del file .BLN..... | 54 |
| 3.5.2 Le condizioni al contorno utilizzate nel presente studio | 55 |
| 3.6 Descrizione delle condizioni al contorno..... | 58 |
| 3.6.1 Struttura del file .BCC | 58 |
| 3.6.2 Il file .BCC utilizzato nel presente studio | 59 |
| 3.6.3 Individuazione delle scale di deflusso per la sezione di valle..... | 60 |
| 3.7 I file input.txt e run_simulazione..... | 68 |
| 4. DESCRIZIONE DATI DI OUTPUT | 71 |
| 4.1 Restituzione delle mappe | 72 |
| 4.2 Restituzione della portata transitante..... | 73 |
| 4.3 Restituzione dei livelli | 76 |

| | |
|---|------------|
| 5. TARATURA E VALIDAZIONE DEL MODELLO..... | 77 |
| 5.1 Evento ottobre 2000 | 81 |
| 5.2 Evento aprile-maggio 2009..... | 89 |
| 5.3 Evento novembre 2014 | 95 |
| 6. SIMULAZIONE DI EVENTI SINTETICI | 102 |
| 6.1 Eventi con tempo di ritorno di 50, 100 e 200 anni | 102 |
| 7. CONCLUSIONI | 115 |
| BIBLIOGRAFIA | 117 |
| RINGRAZIAMENTI | 118 |

1 Introduzione

1.1 Obiettivo dello studio

L'obiettivo della presente tesi è verificare lo stato geometrico as built dell'arginatura consortile della golena situata in località Ghiarole, nel comune di Brescello, in provincia di Reggio Emilia.

Per effettuare questa verifica la scelta è stata quella di riprodurre e simulare, attraverso l'utilizzo di un modello numerico bidimensionale e multirisoluzione alle acque basse (che verrà descritto nel dettaglio in seguito), eventi di piena da applicare ad un determinato dominio di controllo che contenga al suo interno la golena in esame. In tal modo il modello restituisce numerose ed esaustive informazioni sull'interazione tra lo stato attuale dell'arginatura ed eventi di piena simulati per potere individuare il comportamento della golena ed, eventualmente, constatare la presenza di punti di criticità sui quali porre l'attenzione per eventuali interventi (strutturali e non) futuri.

Nella prima parte del lavoro sono state condotte le indagini e gli approfondimenti necessari per individuare la migliore impostazione del modello di calcolo, come la definizione delle condizioni al contorno da imporre e l'individuazione dei parametri di scabrezza dell'alveo inciso e delle aree golenali. Successivamente si è passati alla taratura e alla validazione del modello, confrontando, per alcuni eventi di piena, i livelli idrometrici ottenuti dalle simulazioni con quelli registrati all'idrometro di Boretto.

Infine si è provveduto a simulare eventi di piena sintetici di assegnato tempo di ritorno, verificando il comportamento della golena ed effettuando un'analisi approfondita sulle modalità di riempimento.

1.2 Descrizione dell'area oggetto di interesse e cenni storici

La golena in esame è ubicata in destra idraulica sia del fiume Po sia del torrente Enza (che dopo poche decine di metri affluisce nel Grande Fiume dopo 93 chilometri di corso, vedi *Fig.1.1*). Si tratta di una golena chiusa, ciò significa che tra l'argine maestro destro ed il fiume vi è la presenza di un ulteriore argine, definito appunto golenale, che ha lo scopo di proteggere ulteriormente la golena stessa da allagamenti provocati da eventi di piena di modesto tempo di ritorno.

L'argine golenale (che ha una quota di coronamento inferiore rispetto a quella dell'argine maestro) ha inizio poco dopo Coenzo (PR) e termina poco prima di Brescello (RE), dove si ricongiunge nuovamente con l'argine maestro ed ha una lunghezza complessiva di circa 3980 metri.

La golena in esame è di particolare interesse in quanto, diversamente dalla maggior parte delle altre golene, è sede di insediamenti permanenti (attualmente vi sono 220 abitanti residenti) e racchiude al suo interno l'intera frazione di Ghiarole nel comune di Brescello, in provincia di Reggio Emilia.

Il Consorzio Unico di Difesa Terre Golenali del Comune di Brescello [15] è un consorzio obbligatorio che riunisce tutti i proprietari di immobili, terreni e fabbricati che si trovano all'interno del comprensorio di Ghiarole. Il Consorzio gestisce l'argine consortile a difesa del comprensorio.

Le prime cronache documentate sul comprensorio, rinvenute negli archivi storici di Parma, Reggio Emilia e Modena risalgono al XVI secolo.

A metà del 1700 il tessuto urbanistico di Ghiarole si consolida nella configurazione odierna sfruttando la posizione strategica di confine a cavallo di tre stati: Ducato di Parma, Stato Estense e Ducato di Mantova diventando dogana e nodo commerciale.

Molto frequenti le dispute di confine tra stati limitrofi: le cronache storiche riportano numerose revisioni di confini, talvolta di dettaglio, intervenute dal XVI secolo fino all'avvento di Napoleone. Le contendenti erano principalmente il Ducato di Parma e lo Stato Estense anche se talvolta intervenne anche il Ducato di Mantova.

L'avvento dell'unità d'Italia vede la scomparsa del posto di confine e delle guarnigioni a Ghiarole. Gli abitanti mantengono comunque un elevato tenore di vita grazie al commercio, alla pesca ed all'agricoltura. All'inizio del 1900 gli abitanti residenti sono circa 800.

Ad oggi il comprensorio conta circa 220 residenti e circa 200 immobili: l'ultimo edificio costruito sono le ex scuole del Comune di Brescello, edificate poco prima del 1960.

Le prime arginature di cui si hanno notizie documentate risalgono al XVI secolo ed erano rappresentate da una serie di opere discontinue probabilmente erette per la difesa locale di alcuni nuclei abitativi o di alcuni coltivi. Queste arginature erano già in parte collegate con l'arginatura maestra, costruita sulla parte più alta del comprensorio al fine di ridurre il quantitativo di materiale necessario per la difesa. L'arginatura maestra è riportata in cronache storiche del XVI secolo come argine destro del canale Cases, che alimentava l'omonimo mulino tuttora esistente.

A partire dall'inizio del 1700 le arginature si sono evolute in una rete di comprensori definiti "quadre" a resilienza crescente, per laminare l'effetto delle piene allagando progressivamente i comprensori difesi. Nel XVIII e nel XIX secolo i torrenti Parma ed Enza sono stati deviati consentendo di riunire il comprensorio in un'unica area.

Già sul finire del 1800 le arginature vengono gestite da consorzi di difesa e da privati (quadre). Si contano 4 consorzi e 3 quadre. Tutte queste organizzazioni vengono riunite nel 1927 nel Consorzio Unico di Difesa Terre Golenali del Comune di Brescello. A metà degli anni '70 del secolo scorso il sistema di arginature a "quadre" viene demolito mantenendo solo l'arginatura perimetrale, attualmente esistente.

L'arginatura vede un primo intervento di ringrosso a seguito della rottura per imbibizione avvenuta nel 1994 ed un secondo intervento volto all'aumento della resilienza che viene completato nel 2009 a seguito di accordo di programma tra AIPo e Comune di Brescello.

Ad oggi il Consorzio Unico di Difesa Terre Golenali del Comune di Brescello risulta essere il consorzio privato con più unità immobiliari difese sull'asse fluviale del Po.

La golenale di Ghiarole è stata inondata solamente due volte nel corso della sua storia recente, a seguito di altrettanti eventi di piena particolarmente significativi, i più importanti degli ultimi 65 anni: la prima volta nel 1951 e la seconda volta nel 1994, anche se in questo secondo caso l'invaso della golenale non è stato causato dal sormonto dell'argine golenale ma dalla rottura di parte dello stesso per cedimento ed imbibizione. Nell'anno 2000 si è evitato l'invaso della golenale solamente attraverso una tempestiva azione di sacchettatura dell'argine golenale in più punti: senza questo accorgimento artificiale l'invaso naturale sarebbe stato certo. Nell'ultima piena importante del novembre 2014 la golenale non è stata invasata.



Fig.1.1 Vista aerea della golena di località Ghiarole (Brescello, RE) da Google Earth.

1.3 Individuazione del dominio di calcolo

Per la simulazione della dinamica conseguente al transito di un'onda di piena il primo passo da effettuare è l'individuazione del dominio di calcolo. Per esigenze computazionali il dominio in esame non può esaurirsi alla sola area in prossimità della golena, in quanto si avrebbe un'insufficienza di dati di contorno e un livello di dettaglio inadeguato. Di conseguenza si è deciso di considerare il tratto di Po, di sviluppo pari a circa 25 km, che ha inizio a monte in corrispondenza del ponte ferroviario di Casalmaggiore (CR) e termina a valle in corrispondenza del ponte stradale di Guastalla (RE). Il contorno del dominio è completato dagli argini maestri (destro e sinistro) per un'area totale di calcolo di circa 75 km². Si tratta di un dominio di calcolo particolarmente esteso ed articolato che contiene al suo interno, oltre al fiume Po, le immissioni di tre suoi affluenti di destra (i torrenti Parma, Enza e Crostolo) e numerose golene (vedi Fig.1.2). L'area copre 11 comuni distribuiti in 4 province e 2 regioni:

- Comuni di Colorno, Mezzani e Sorbolo in provincia di Parma in Emilia Romagna (in destra idraulica del Po);
- Comuni di Brescello, Boretto, Gualtieri e Guastalla in provincia di Reggio Emilia in Emilia Romagna (in destra idraulica del Po);
- Comune di Casalmaggiore in provincia di Cremona in Lombardia (in sinistra idraulica del Po);
- Comuni di Viadana, Pomponesco e Dosolo in provincia di Cremona in Lombardia (in sinistra idraulica del Po).

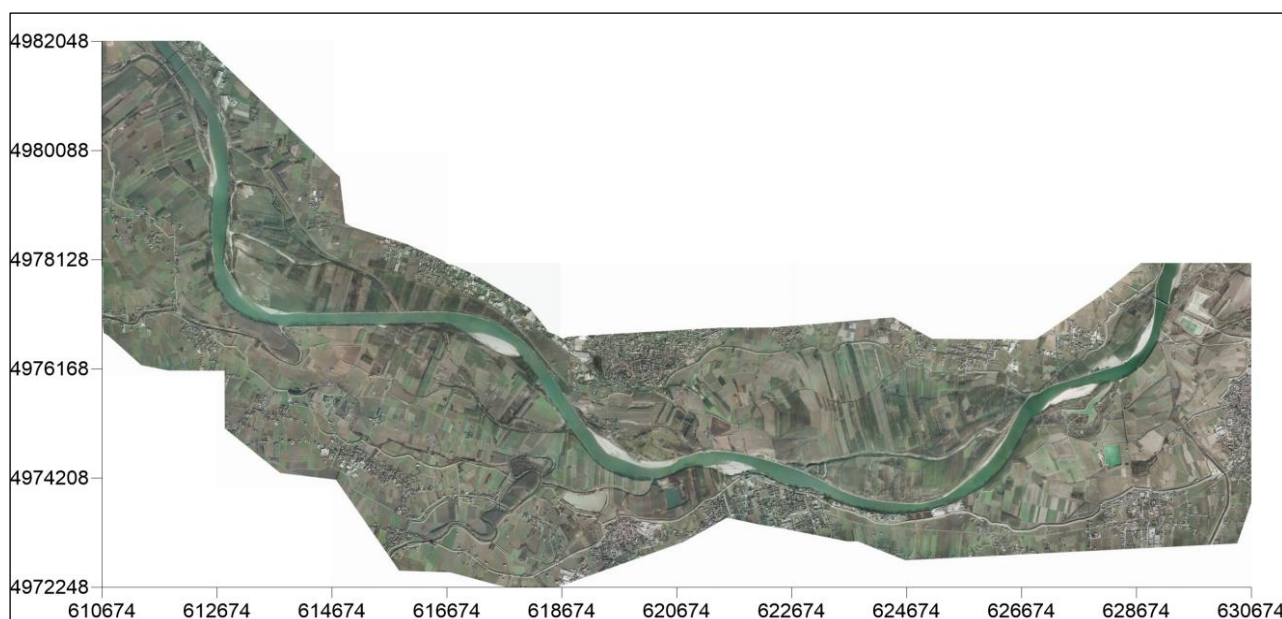


Fig.1.2 Individuazione del dominio di calcolo.

1.4 Individuazione della pendenza del tratto di Po di interesse

Per definire ed approfondire la conoscenza del dominio di calcolo e ai fini di successive considerazioni si è reso necessario individuare un valore della pendenza media dell'alveo del Po nel tratto di interesse.

L'attenzione si è focalizzata particolarmente sul tratto di valle: infatti in corrispondenza della sezione coincidente con il ponte di Guastalla è stato successivamente necessario determinare più scale delle portate e uno dei dati fondamentali risiede nella conoscenza della pendenza dell'alveo.

A tale scopo sono state considerate 4 sezioni a monte e 10 sezioni a valle del ponte di Guastalla. Come da nomenclatura del rilievo topografico del fiume Po realizzato nel 2005 dall'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPo) tali sezioni sono denominate rispettivamente: 38A, 38B, 38C, 38D a monte del ponte; 38D_1, 38E, 39, 39A, 39B, 39C, 39D, 39E, 39F, 40 a valle del ponte.

Per il tratto congiungente 2 sezioni consecutive la pendenza è stata calcolata dal rapporto tra la differenza di quota tra l'arginatura maestra tra le 2 sezioni e la distanza tra le due sezioni stesse (vedi *Tab.1.1* e *Tab.1.2* rispettivamente per l'argine maestro destro e l'argine maestro sinistro). Come quote di riferimento si sono adottate quelle del rilievo del Po del 2005 da parte dell'AIPo.

| Nome della sezione | Quota argine dx [m s.l.m.] | Progressiva [m] | Distanza sezioni [m] | Delta z [m] | Pendenza i tratto [-] |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------------|---------------|-------------------------|
| 38A | 29.37 | 445239 | 800 | 0.13 | 0.0002 |
| 38B | 29.24 | 446039 | 969 | 0.35 | 0.0004 |
| 38C | 28.89 | 447008 | 909 | 0.37 | 0.0004 |
| 38D | 28.52 | 447917 | 534 | -0.26 | -0.0005 |
| 38D_1 | 28.78 | 448451 | 984 | 0.18 | 0.0002 |
| 38E | 28.60 | 449435 | 1212 | 0.35 | 0.0003 |
| 39 | 28.25 | 450647 | 1288 | -0.29 | -0.0002 |
| 39A | 28.54 | 451935 | 1127 | 0.48 | 0.0004 |
| 39B | 28.06 | 453062 | 1231 | 0.47 | 0.0004 |
| 39C | 27.59 | 454293 | 1635 | 0.26 | 0.0002 |
| 39D | 27.33 | 455928 | 1735 | 0.02 | 0.0000 |
| 39E | 27.31 | 457663 | 1871 | 0.36 | 0.0002 |
| 39F | 26.95 | 459534 | 842 | -0.31 | -0.0004 |
| 40 | 27.26 | 460376 | | | |

Tab.1.1 Calcolo della pendenza sulla base delle quote dell'arginatura destra.

| Nome della sezione | Quota argine sx [m s.l.m.] | Progressiva [m] | Distanza sezioni [m] | Delta z [m] | Pendenza i tratto [-] |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------------|---------------|-------------------------|
| 38A | 29.62 | 445239 | 800 | 0.53 | 0.00066 |
| 38B | 29.09 | 446039 | 969 | 0.16 | 0.00017 |
| 38C | 28.93 | 447008 | 909 | 0.22 | 0.00024 |
| 38D | 28.71 | 447917 | 534 | -0.50 | -0.00094 |
| 38D_1 | 29.21 | 448451 | 984 | 0.31 | 0.00032 |
| 38E | 28.90 | 449435 | 1212 | 0.22 | 0.00018 |
| 39 | 28.68 | 450647 | 1288 | 0.59 | 0.00046 |
| 39A | 28.09 | 451935 | 1127 | 0.39 | 0.00035 |
| 39B | 27.70 | 453062 | 1231 | 0.01 | 0.00001 |
| 39C | 27.69 | 454293 | 1635 | 0.03 | 0.00002 |
| 39D | 27.66 | 455928 | 1735 | 0.41 | 0.00024 |
| 39E | 27.25 | 457663 | 1871 | 0.42 | 0.00022 |
| 39F | 26.83 | 459534 | 842 | -0.54 | -0.00064 |
| 40 | 27.37 | 460376 | | | |

Tab.1.2 Calcolo della pendenza sulla base delle quote dell'arginatura sinistra.

La pendenza è stata valutata come media aritmetica tra le singole pendenze calcolate per i tratti tra le sezioni analizzate.

Da questo calcolo vengono restituiti i seguenti valori:

- Pendenza media arginatura maestra destra: 0.11‰;
- Pendenza media arginatura maestra sinistra: 0.10‰.

I risultati ottenuti sono abbastanza concordanti tra loro. Ai fini della stima della scala delle portate nella sezione di valle del dominio di calcolo la pendenza è stata assunta pari a 0.10‰.

2 Modello di calcolo

I modelli matematici per lo studio dei fenomeni di moto vario di un'asta fluviale permettono la simulazione di un evento di piena restituendo l'interazione dell'evento stesso con il dominio di calcolo individuato.

Esistono essenzialmente due tipi di modelli di propagazione di un'onda di piena:

- Modelli idraulici: questi modelli si basano su formulazioni matematiche che esprimono i principi fisici di conservazione; la loro risoluzione richiede una conoscenza dettagliata della geometria del dominio di calcolo e importanti oneri computazionali;
- Modelli idrologici: questi modelli si basano su formulazioni almeno in parte empiriche; per questo motivo la loro risoluzione richiede una conoscenza meno dettagliata della geometria del dominio di calcolo e per questo motivo sono adatti per descrivere solo un numero limitato di fenomeni.

Alcuni fenomeni particolarmente complicati ed articolati possono essere simulati e descritti solamente con l'ausilio dei modelli idraulici. A loro volta all'interno della vastità dei modelli di tipo idraulico i modelli si differenziano in base alla schematizzazione (mono, bi o tridimensionale) del campo di moto. I modelli monodimensionali sono i più semplici, ma sono adeguati solo qualora il deflusso presenti caratteristiche prevalentemente monodirezionali. L'approssimazione monodimensionale non è più accettabile nel caso in cui si vogliano simulare eventi di piena per i quali è necessario, ad esempio, differenziare correttamente le condizioni di deflusso tra alveo inciso e zone golenali o qualora si abbiano invasi di golene chiuse e/o allagamenti connessi a rotte arginali. In questi casi si preferisce utilizzare una schematizzazione bidimensionale. I modelli tridimensionali, molto onerosi e complessi, si utilizzano solo per simulare fenomeni localizzati.

2.1 Equazioni del moto vario 1D

Le equazioni del moto vario 1D, denominate equazioni del De Saint Venant, si basano sulle seguenti ipotesi:

- a. il moto è monodimensionale, di conseguenza la dipendenza è dalla variabile temporale t e da un'unica variabile spaziale s (l'ascissa curvilinea lungo il thalweg);
- b. la pendenza del fondo è piccola, di conseguenza l'angolo compreso tra il fondo e l'orizzontale può essere confuso con il suo seno e con la sua tangente;
- c. le traiettorie presentano curvature ridotte, di conseguenza le accelerazioni verticali sono trascurabili e la distribuzione delle pressioni lungo la verticale può essere considerata idrostatica;
- d. la velocità è uniforme lungo la sezione trasversale;
- e. la cadente idraulica può essere espressa con qualunque formulazione relativa alla condizione di moto permanente.

Le equazioni del moto vario 1D sono raggruppate all'interno di un sistema che esprime i principi fisici seguenti:

1. Equazione di continuità (conservazione della massa);
2. Equazione di bilancio della quantità di moto.

2.1.1 Equazione di continuità

L'equazione di continuità applicata alle correnti esprime direttamente il principio fisico della conservazione della massa. In particolare è necessario definire un volume di controllo di lunghezza infinitesima pari a ds e di sezione trasversale pari ad A . Mediante l'applicazione del teorema del trasporto si può affermare che la variazione di massa all'interno del volume di controllo in un intervallo di tempo è pari al bilancio tra la massa entrante e la massa uscente dal volume di controllo nello stesso intervallo di tempo.

Di conseguenza si ha che:

$$\left(\rho Q + \frac{\partial \rho Q}{\partial s} ds\right) dt + \rho Q dt = \rho A ds - \left(\rho A + \frac{\partial \rho A}{\partial t} dt\right) ds \quad [M] \quad [2.1]$$

Nella precedente espressione [2.1] si ha che:

ρ [ML^{-3}] è la densità del fluido in esame;

Q [L^3T^{-1}] è la portata che attraversa il volume di controllo;

A [L^2] è l'area della sezione trasversale;

dt [T] è l'intervallo infinitesimo di tempo;

ds [L] è la lunghezza infinitesima del volume di controllo.

Semplificando alcuni termini (tra cui anche la densità ρ sotto l'ipotesi di incomprimibilità del fluido) si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad [L^2T^{-1}] \quad [2.2]$$

2.1.2 Equazione di bilancio della quantità di moto

L'equazione di bilancio della quantità di moto è ricavata dalla seconda legge della dinamica. Con riferimento allo stesso volume di controllo definito in precedenza si ha che la variazione della quantità di moto al suo interno è pari alla sommatoria delle forze esterne agenti sul volume stesso.

In particolare si ha che:

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} - \rho V_1 Q_1 + \rho V_2 Q_2 = \sum F_{esterne} \quad [MLT^{-2}] \quad [2.2]$$

Da cui:

$$\frac{\partial \rho V A ds}{\partial t} - \rho V Q + \rho \left(QV + \frac{\partial QV}{\partial s} ds \right) = \sum F_{esterne} \quad [MLT^{-2}] \quad [2.3]$$

Effettuando le opportune semplificazioni e sostituzioni (ricordando che $Q=VA$) si ottiene:

$$\rho \frac{\partial Q}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{Q^2}{A} \right) ds = \sum F_{esterne} \quad [MLT^{-2}] \quad [2.4]$$

Infine, esplicitando le forze esterne (sommatoria di forza peso, resistenze delle pareti, forze idrostatiche sulle sezioni e azione idrostatiche sul contorno laterale) si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gI_2 + gA(i - j) \quad [L^3T^{-2}] \quad [2.5]$$

Nelle precedenti espressioni [2.2], [2.3], [2.4] e [2.5], si ha che:

$\rho [ML^{-3}]$ è la densità del fluido in esame;

$Q [L^3T^{-1}]$ è la portata che attraversa il volume di controllo;

$V [LT^{-1}]$ è la velocità;

$A [L^2]$ è l'area della sezione trasversale;

$dt [T]$ è l'intervallo di tempo;

$ds [L]$ è la lunghezza del volume di controllo;

$g [LT^{-2}]$ è l'accelerazione di gravità, pari a $9.806 m/s^2$;

$I_1 [L^3]$ è il momento statico della sezione bagnata rispetto a pelo libero;

$I_2 [L^2]$ è un fattore che tiene conto della non prismaticità dell'alveo;

$i [-]$ è la pendenza del fondo;

$j [-]$ è la cadente idraulica.

Si ottiene il seguente sistema differenziale alle derivate parziali, del primo ordine, di tipo iperbolico, non lineare, nelle incognite A e Q :

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 & [L^2T^{-1}] \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gI_2 + gA(i - j) & [L^3T^{-2}] \end{cases} \quad [2.6]$$

Questi tipi di sistemi possono essere risolti seguendo diversi metodi:

- Metodo delle linee caratteristiche;
- Metodo agli elementi finiti;
- Metodo alle differenze finite;
- Metodo ai volumi finiti.

Per alcuni di questi metodi è opportuno esplicitare le equazioni precedenti nelle incognite V e h (profondità idriche).

Si ottiene quindi il seguente sistema (con B larghezza del pelo libero):

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{A}{B} \frac{\partial V}{\partial s} + V \frac{\partial h}{\partial s} + \frac{V}{B} \frac{\partial A}{\partial s} = 0 & [LT^{-1}] \\ \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial h}{\partial s} = i - j & [-] \end{cases} \quad [2.7]$$

2.2 Equazioni del moto vario 2D

Lo schema bidimensionale risulta essere più generale. In particolare si fa riferimento ad un sistema che tiene conto della legge di conservazione della massa e delle due equazioni di bilancio della quantità di moto lungo le due direzioni x ed y , che nel complesso danno origine alle equazioni alle acque basse. Il modello di calcolo utilizzato per la presente tesi è stato sviluppato dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Ambiente, del Territorio e Architettura (Vacondio et al. 2014) e si basa appunto sulla risoluzione di queste equazioni (SWE: Shallow Water Equations) bidimensionali mediante l'applicazione del metodo dei volumi finiti.

Il metodo consiste nel discretizzare l'equazione della conservazione della massa e le equazioni del bilancio della quantità di moto direttamente nello spazio fisico; in questo modo si ha la possibilità di stabilire una griglia di calcolo arbitraria rispetto cui definire i volumi di controllo necessari per discretizzare le equazioni stesse.

L'equazione della conservazione della massa in forma integrale ha la seguente formulazione:

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho dV = 0 \quad [2.8]$$

Applicando il teorema del trasporto e passando alla definizione di volume euleriano si ottiene:

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho dV = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_S \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS \quad [2.9]$$

Scrivendo invece l'equazione in forma integrale e generalizzata si ottiene:

$$\int_V \Phi dV = \int_V \frac{\partial \psi}{\partial t} dV + \int_S \psi \vec{u} \cdot \vec{n} dS \quad [2.10]$$

In cui:

ψ rappresenta la quantità di massa che si conserva;

\vec{u} è il vettore velocità;

V è il volume di controllo di superficie S ;

\vec{n} è la normale ad S , positiva se uscente;

Φ è la variazione di ψ per effetto dei termini sorgente presenti in V .

Se si suddivide il volume di controllo V in n sottovolumi si avrebbe un numero pari ad n di equazioni di conservazione della massa per ciascun sottovolume:

$$\Phi_j V_j = \frac{\partial}{\partial t} (\psi_j V_j) + \sum_{k=1}^m \psi_k \vec{u}_k \cdot \vec{n}_k S_k \quad [2.11]$$

In particolare i termini con pedice j individuano il valore medio di quella grandezza, dipendente dai flussi scambiati attraverso le m pareti della cella stessa e dalla variazione del termine sorgente S .

È quindi necessario conoscere il volume, la superficie e i flussi scambiati per ogni sottovolume.

Nel modello utilizzato i volumi di controllo sono rappresentati dalle celle di forma quadrata e di dimensione variabile e la determinazione delle grandezze da riferire alle celle avviene sulla base dei flussi scambiati tra e celle adiacenti.

Per potere simulare lunghi eventi di piena che presuppongono scenari di allagamento si sfrutta l'architettura CUDA (Compute Unified Device Architecture) che permette di effettuare i calcoli paralleli sulle GPU delle schede video NVIDIA, con la possibilità quindi di velocizzare enormemente i tempi di simulazione e di calcolo.

Le equazioni del moto a superficie libera, nella loro approssimazione alle “acque basse” sono ricavate attraverso l'integrazione sulla verticale delle equazioni di continuità e delle equazioni di Navier-Stokes, sotto le stesse ipotesi individuate per le equazioni del De Saint Venant (vedi *Par.2.1*).

Nella loro forma differenziale e conservativa le equazioni possono essere scritte come segue:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{F}, \mathbf{G}) + \mathbf{S} = 0 \quad [2.12]$$

In cui \mathbf{U} rappresenta il vettore delle variabili che si conservano, \mathbf{F} e \mathbf{G} sono i vettori di flusso nelle direzioni x e y e \mathbf{S} è il vettore dei termini sorgente:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \eta \\ uh \\ vh \end{pmatrix} \quad [2.13]$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2 h + \frac{1}{2} g (\eta^2 - 2z\eta) \\ uvh \end{pmatrix} \quad [2.14]$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}g(\eta^2 - 2z\eta) \end{pmatrix} \quad [2.15]$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ g(hS_{f_x} - \eta S_{B_x}) \\ g(hS_{f_y} - \eta S_{B_y}) \end{pmatrix} \quad [2.16]$$

Nelle precedenti formulazioni [2.13], [2.14], [2.15] e [2.16], si ha che:

$\eta = h+z$ è la quota idrica;

h è la profondità idrica;

z è la quota del terreno;

u è la componente della velocità in direzione x ;

v è la componente della velocità in direzione y ;

g è l'accelerazione di gravità, pari a 9.806 m/s^2 ;

$S_{B_x} = -\frac{\partial z}{\partial x}$ è la pendenza del fondo (*Bed Slope*) in direzione x ;

$S_{B_y} = -\frac{\partial z}{\partial y}$ è la pendenza del fondo (*Bed Slope*) in direzione y ;

$S_{f_x} = \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{ghC_f^2}$ è la cadente energetica (*Friction Slope*) in direzione x ;

$S_{f_y} = \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{ghC_f^2}$ è la cadente energetica (*Friction Slope*) in direzione y ;

Il dominio è discretizzato attraverso una griglia di calcolo cartesiana e le equazioni differenziali sono risolte con il metodo dei volumi finiti, basato a sua volta sulle risoluzioni approssimate del problema di Riemann.

Il time step che regola il passo di calcolo è individuato dalla condizione di stabilità di Courant-Friedrichs-Lewy (CFL Condition), necessaria proprio per la convergenza numerica di schemi espliciti come quello in esame.

La condizione di CFL nel caso 2D è la seguente:

$$\Delta t = C_r \cdot \min \left[\frac{\Delta x}{\|u\| + \sqrt{gh}}; \frac{\Delta y}{\|v\| + \sqrt{gh}} \right] \quad [T] \quad [2.16]$$

In cui:

Δt è il passo di calcolo;

Δx è la ampiezza della cella in direzione x ;

Δy è la ampiezza della cella in direzione y ;

C_r è il numero di Courant, adimensionale e compreso tra 0 e 1.

Il modello è accurato al secondo ordine sia nel tempo che nello spazio.

Il secondo ordine di accuratezza nel tempo è ottenuto attraverso un metodo Runge-Kutta a due passi.

Il secondo ordine di accuratezza nello spazio è ottenuto mediante una ricostruzione MUSCL (Monotone Upstream-centered Scheme for Conservation Laws) del vettore U sui bordi della cella.

Per la creazione dei file di input, nonché per la visualizzazione dei file di output, si sono utilizzati i seguenti programmi:

- Surfer;
- Global Mapper;
- Notepad++;
- Excel;
- Cygwin;
- WinSCP;
- Matlab;
- HEC-RAS.

3 Descrizione dei file di input

3.1 Batimtria

Uno dei principali dati di input è relativo alla batimetria (file .BTM) del dominio di calcolo, vale a dire l'andamento planoaltimetrico della zona di interesse.

3.1.1 Validazione del rilievo a disposizione

Prima di addentrarsi nel dettaglio nello studio, si è proceduto quindi ad effettuare un'analisi preliminare per verificare la corrispondenza tra il rilievo della zona a disposizione e il rilievo della stessa zona disponibile sul sito web www.agenziainterregionalepo.it. Si tratta di due rilievi effettuati ad un anno di distanza e soprattutto con tecniche differenti. Il primo, quello a disposizione e ricavato dal DEM (*Digital Elevation Model*) dell'Autorità di Bacino del Fiume Po (Adbpo) è stato realizzato nel 2006 con rilievo con Laser Scanner (tecnica LIDAR, Light Detection and Ranging) per la parte emersa e con rilievo batimetrico per la parte sotto la superficie dell'acqua. Il secondo, vale a dire quello ottenuto e scaricato dal sito dell'AIPo, è datato 2005 e realizzato con tecnica GPS e mette a disposizione numerose sezioni fluviali lungo il corso del Fiume Po e dei suoi affluenti. Attraverso l'utilizzo del software *Surfer* e del comando *Slice* si è provveduto a confrontare le sezioni a disposizione dal sito dell'AIPo con quelle del DEM con griglia a 2 metri, con la speranza di un'elevata corrispondenza. Come è possibile apprezzare nelle seguenti figure (da *Fig.3.1* a *Fig.3.19*) i due rilievi si discostano di poco per tutte le sezioni a disposizione nel tratto da Casalmaggiore a Guastalla (dalla Sezione 35A alla Sezione 38D_1 secondo la nomenclatura del Rilievo del Fiume Po realizzato nel 2005 dall'Agenzia Interregionale per il fiume Po). Si è quindi constatato di avere a disposizione una modello digitale con passo 2 metri che riproduce correttamente la batimetria della zona in studio.

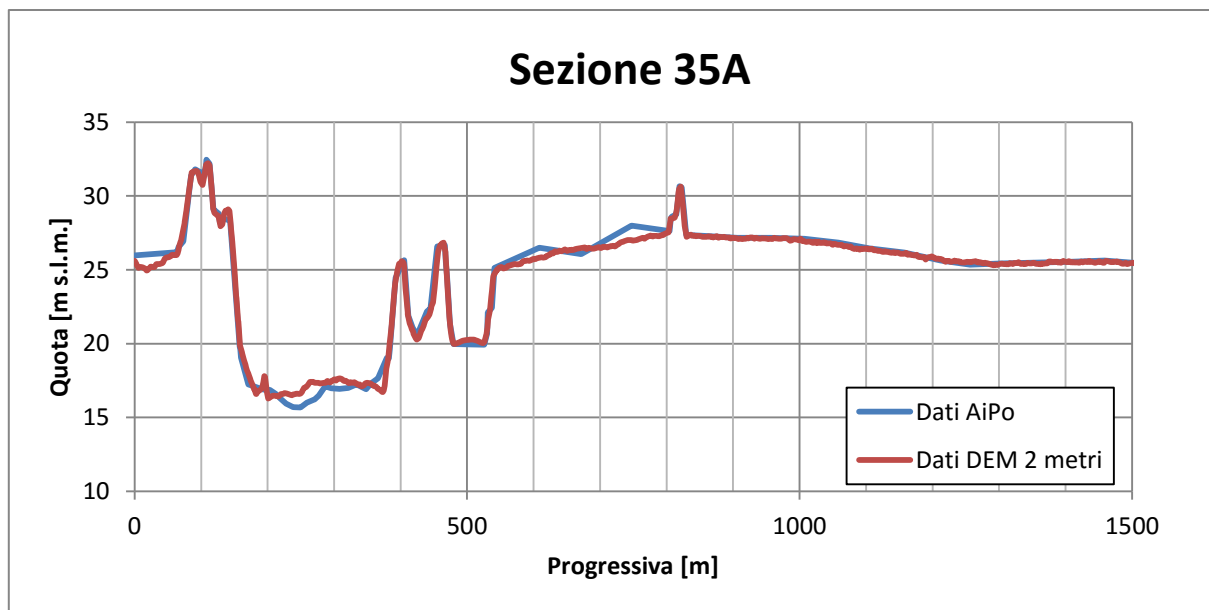


Fig.3.1 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 35A.

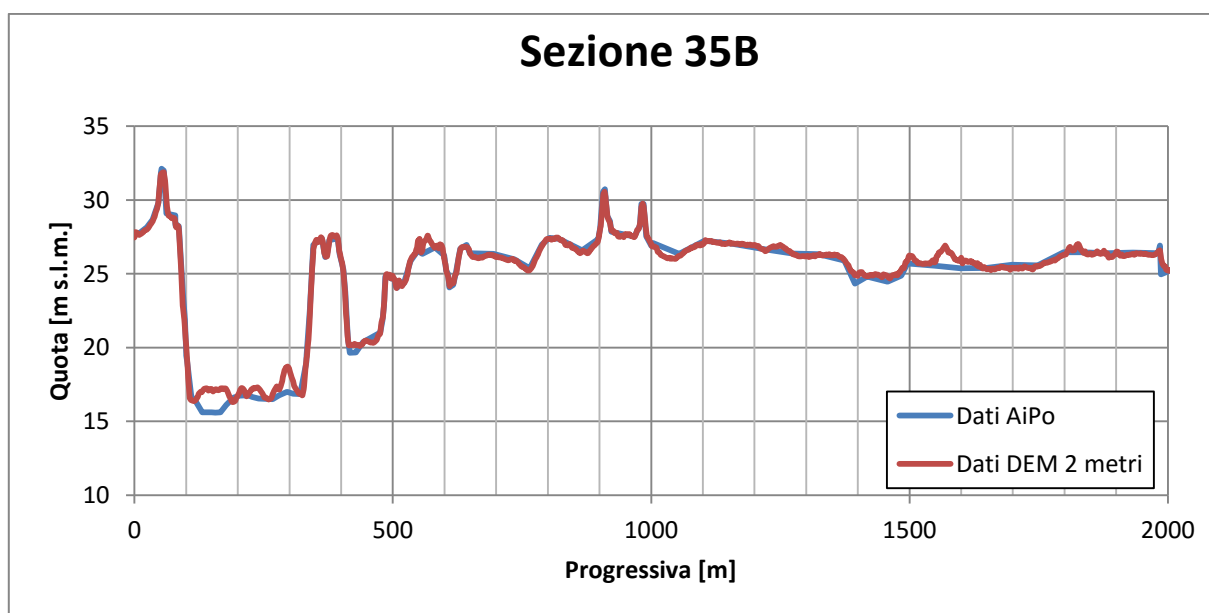


Fig.3.2 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 35B.

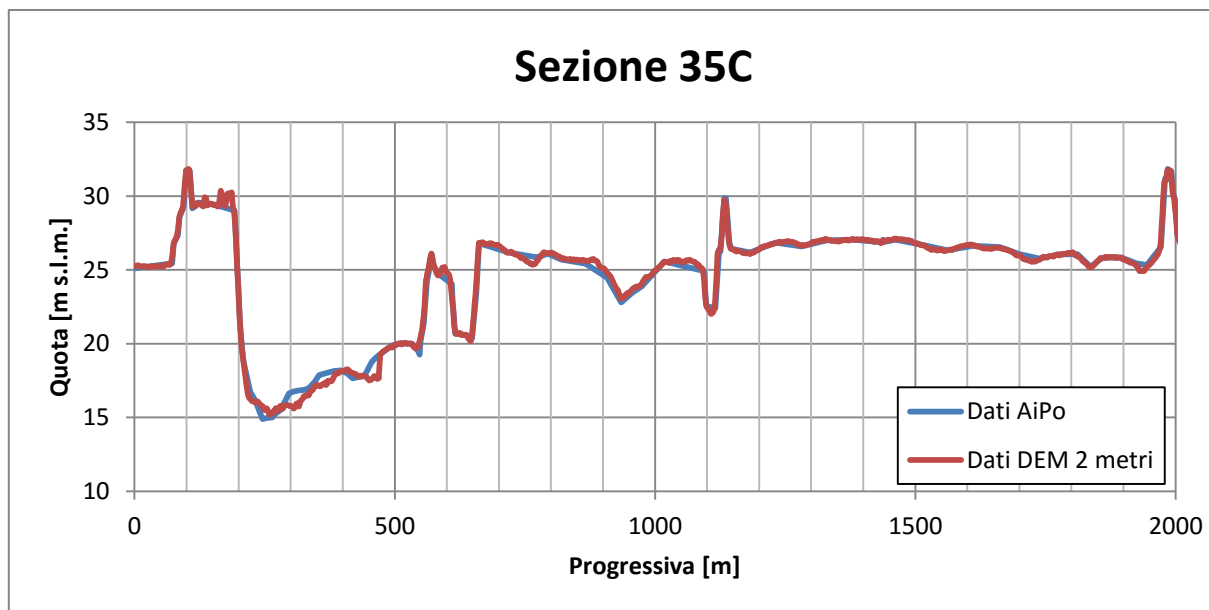


Fig.3.3 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 35C.

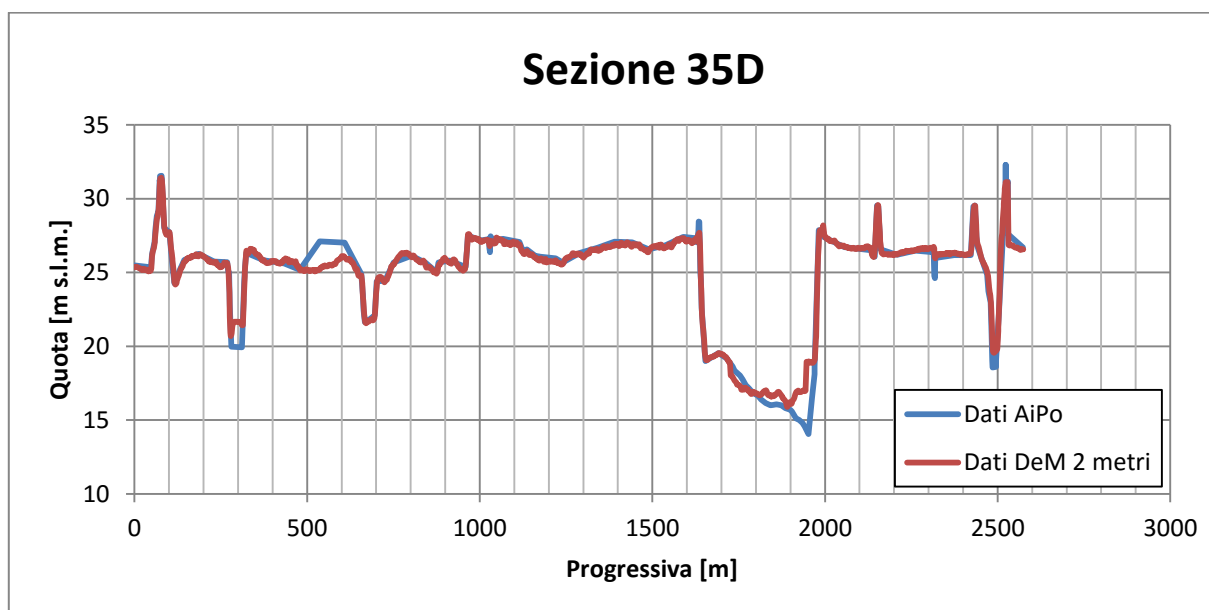


Fig.3.4 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 35D.

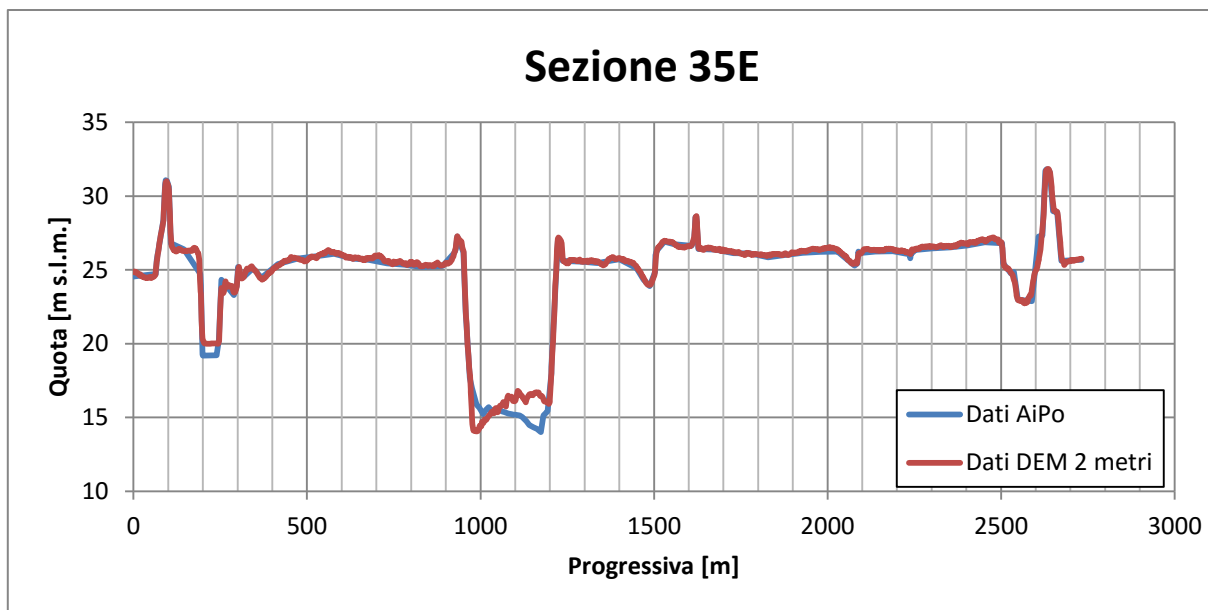


Fig.3.5 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 35E.

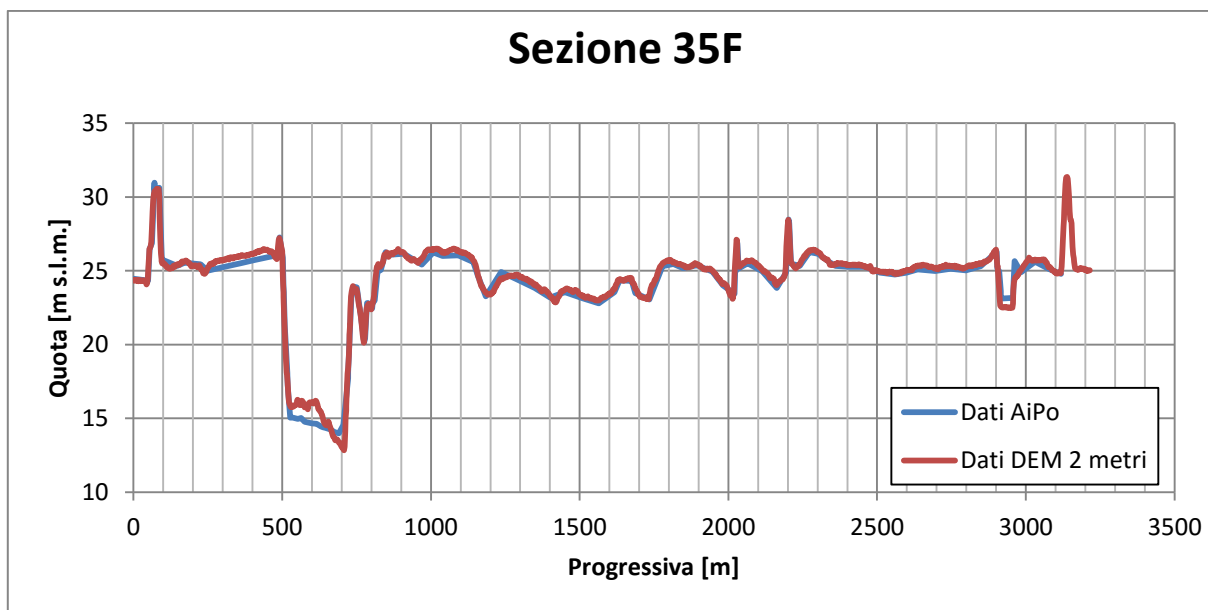


Fig.3.6 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 35F.

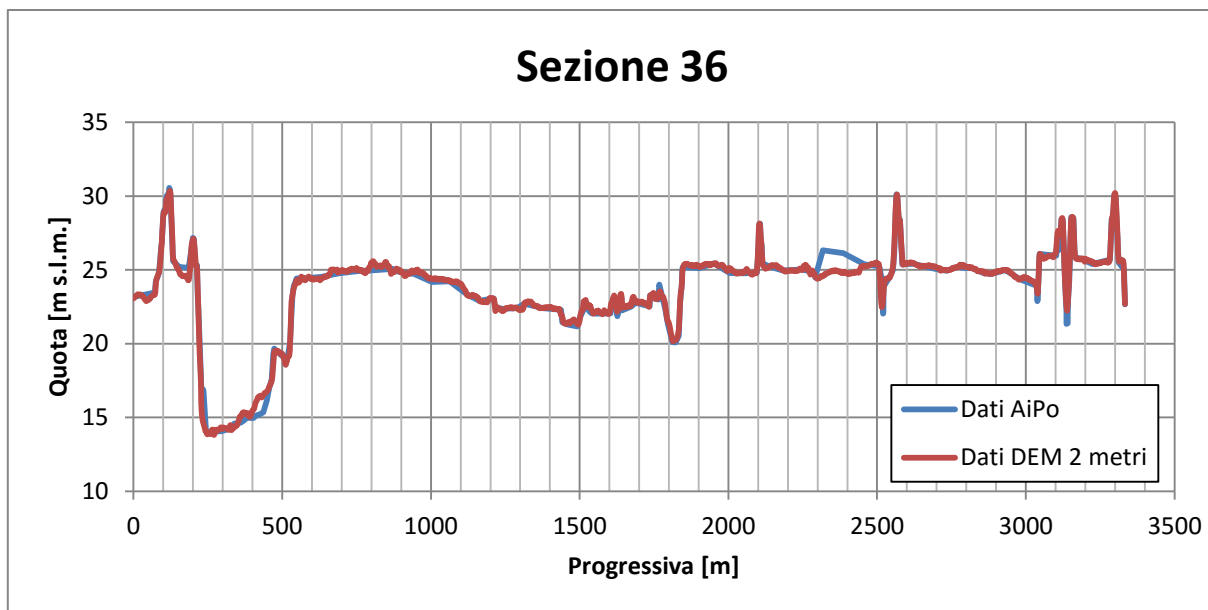


Fig.3.7 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 36.

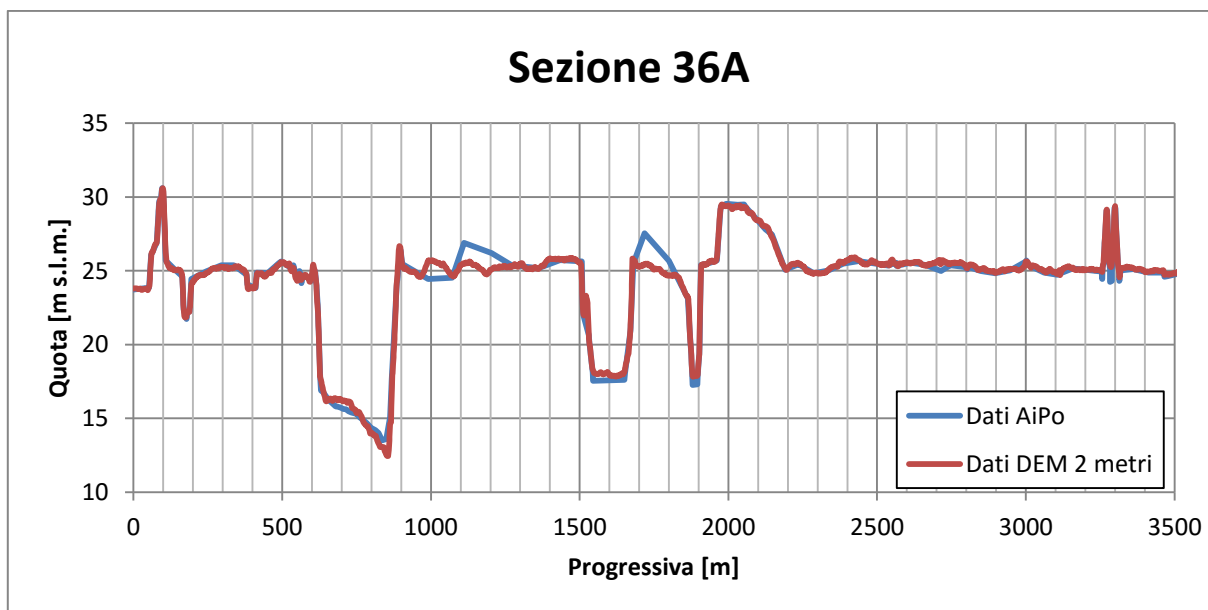


Fig.3.8 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 36A.

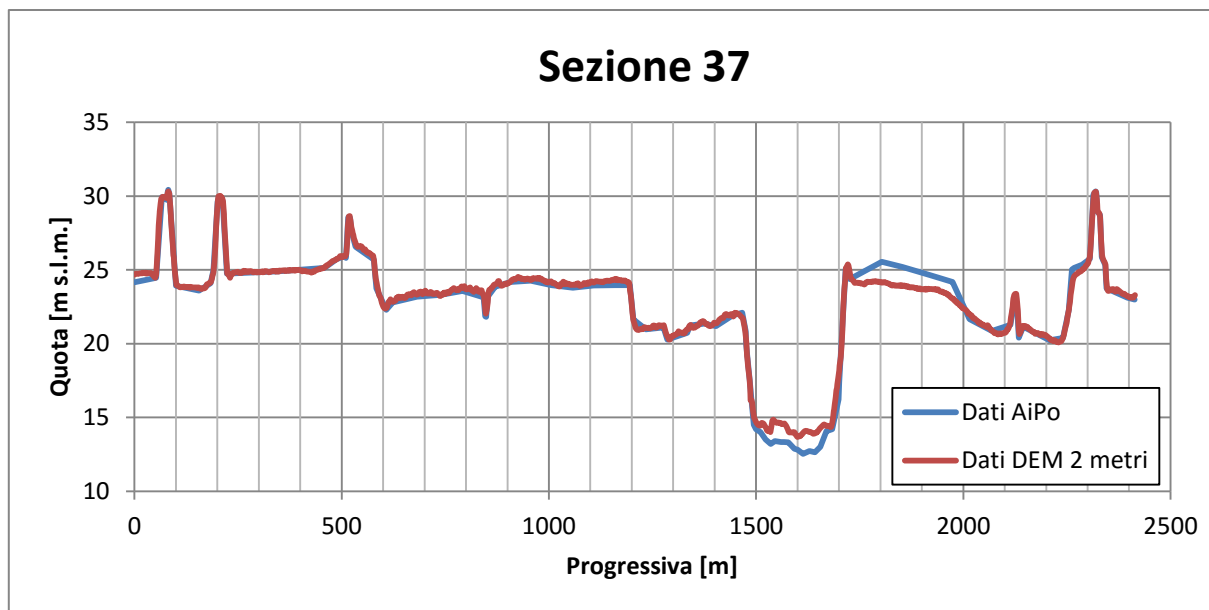


Fig.3.9 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 37.

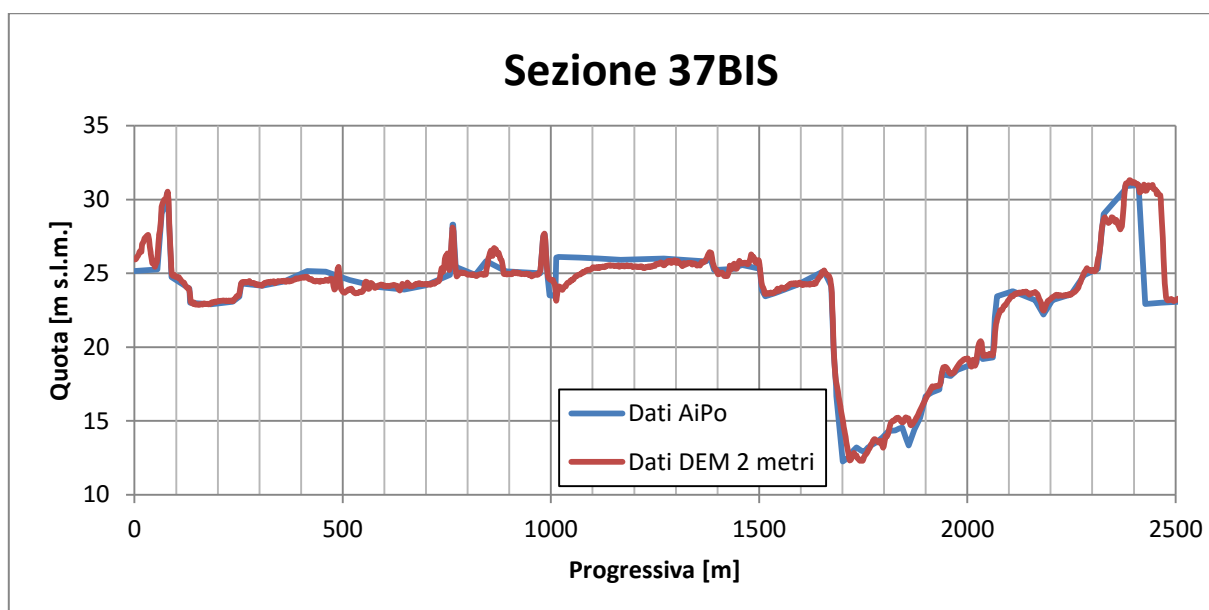


Fig.3.10 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 37BIS.

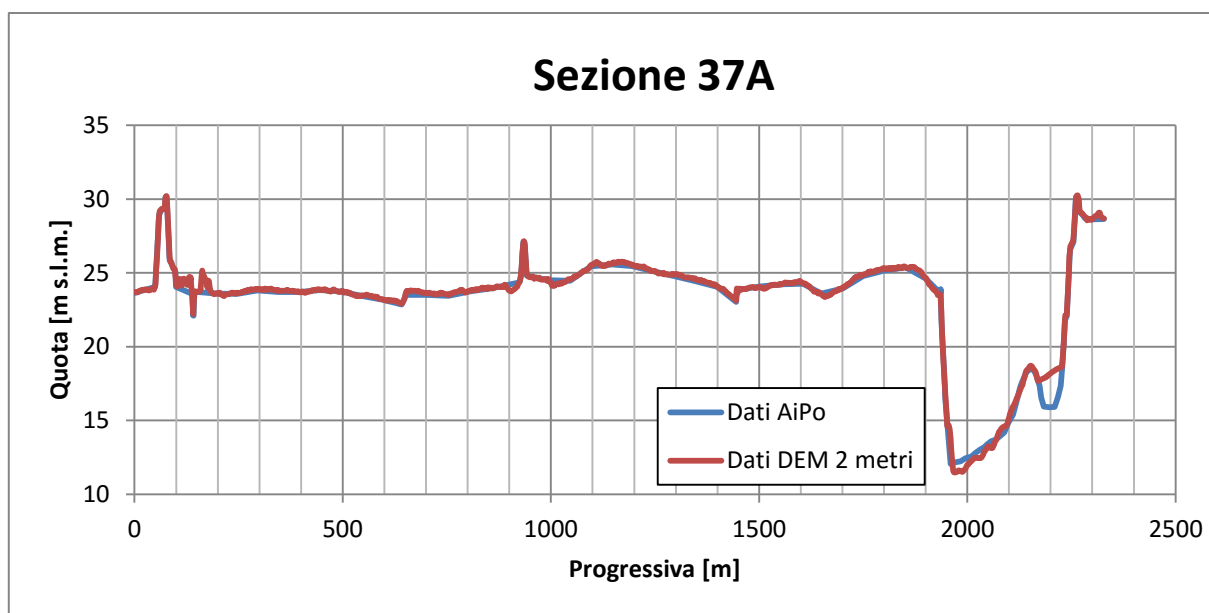


Fig.3.11 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 37A.

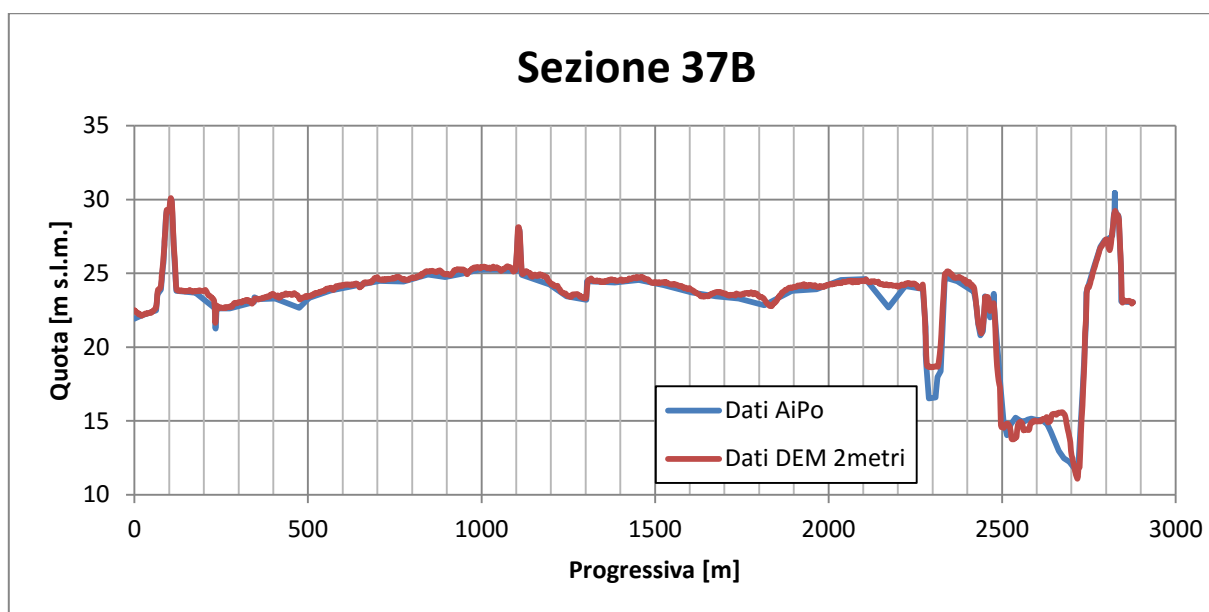


Fig.3.12 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 37B.

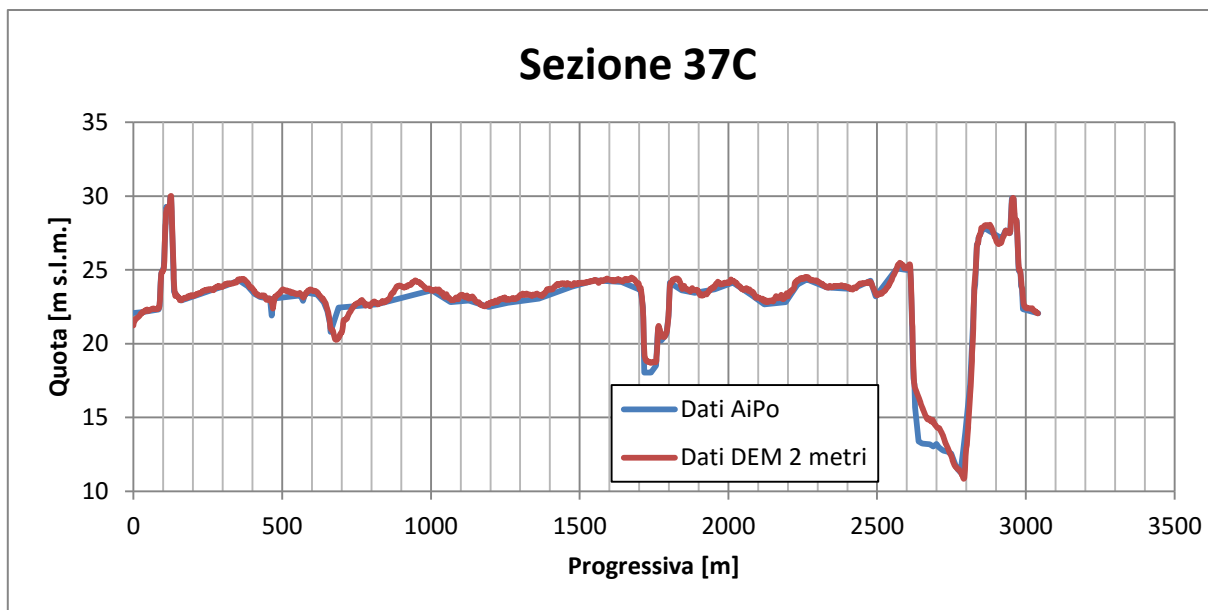


Fig.3.13 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 37C.

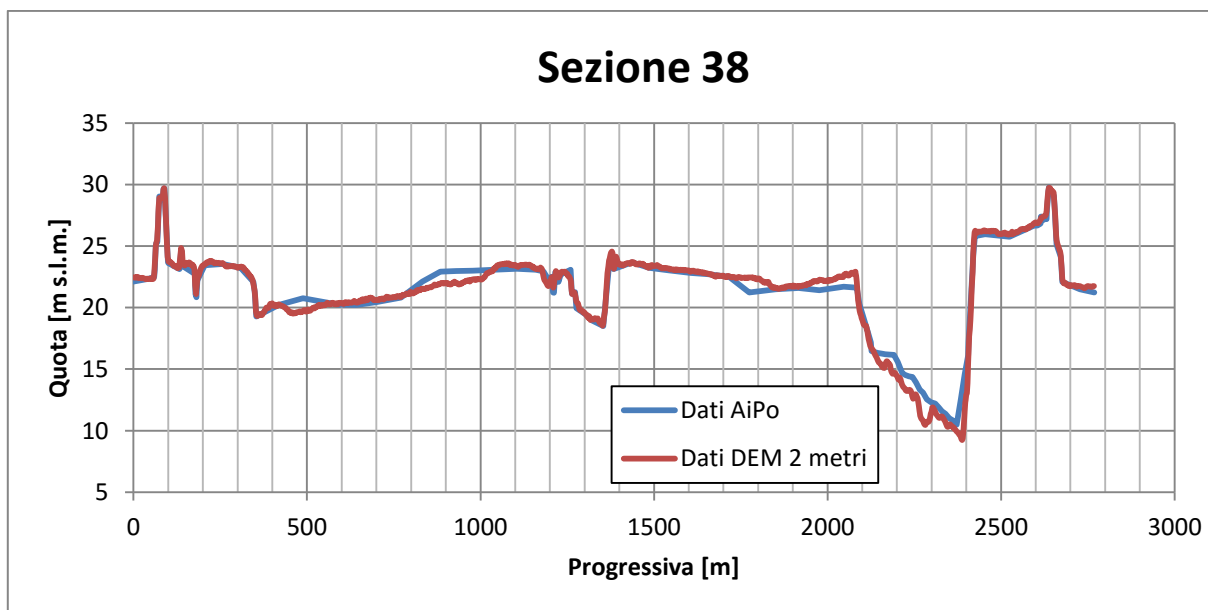


Fig.3.14 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 38.

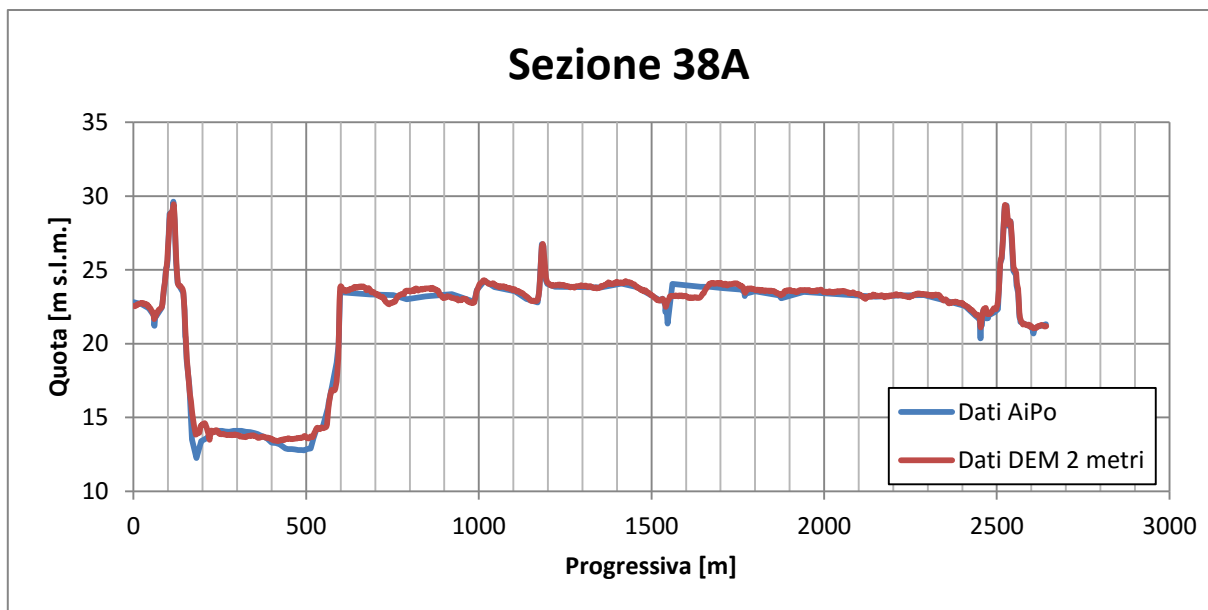


Fig.3.15 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 38A.

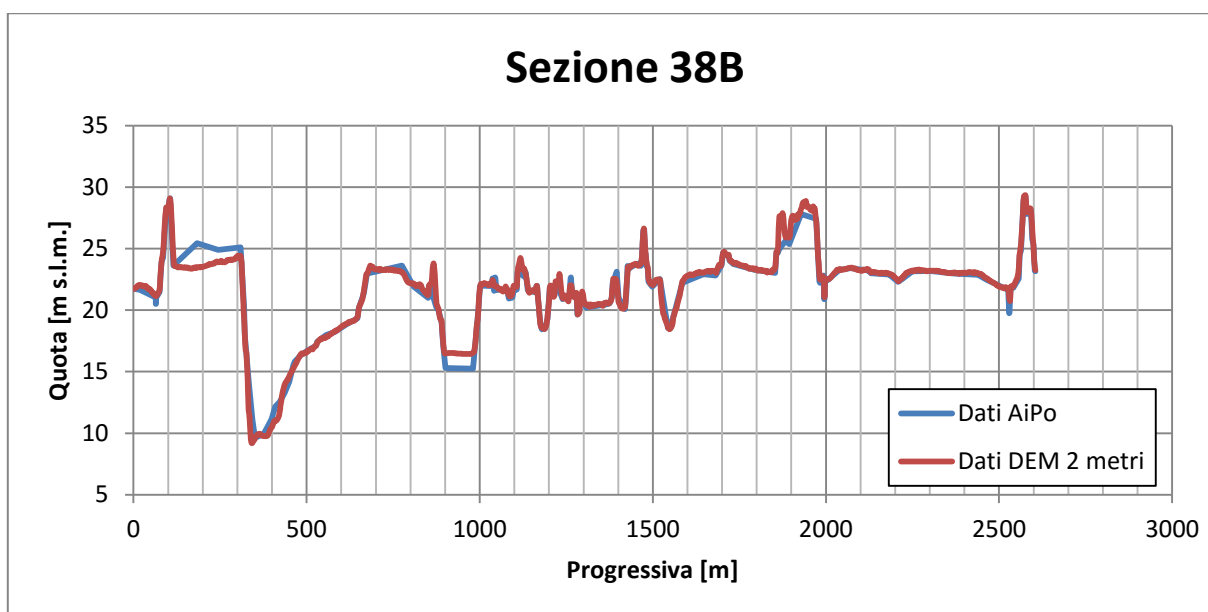


Fig.3.16 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 38B.

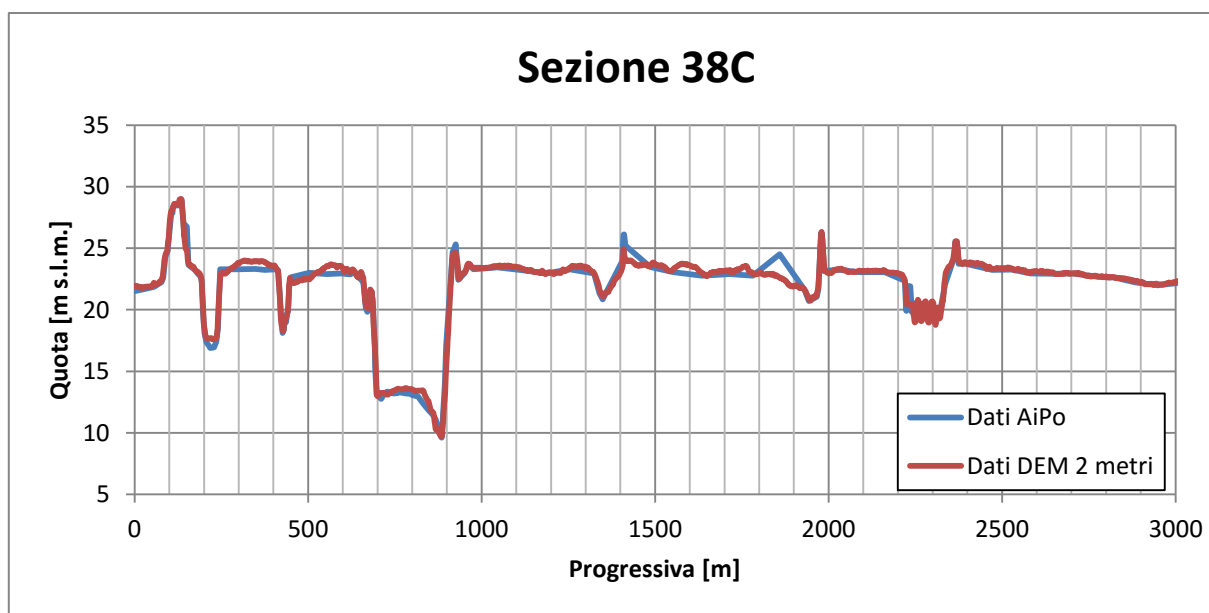


Fig.3.17 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 38C.

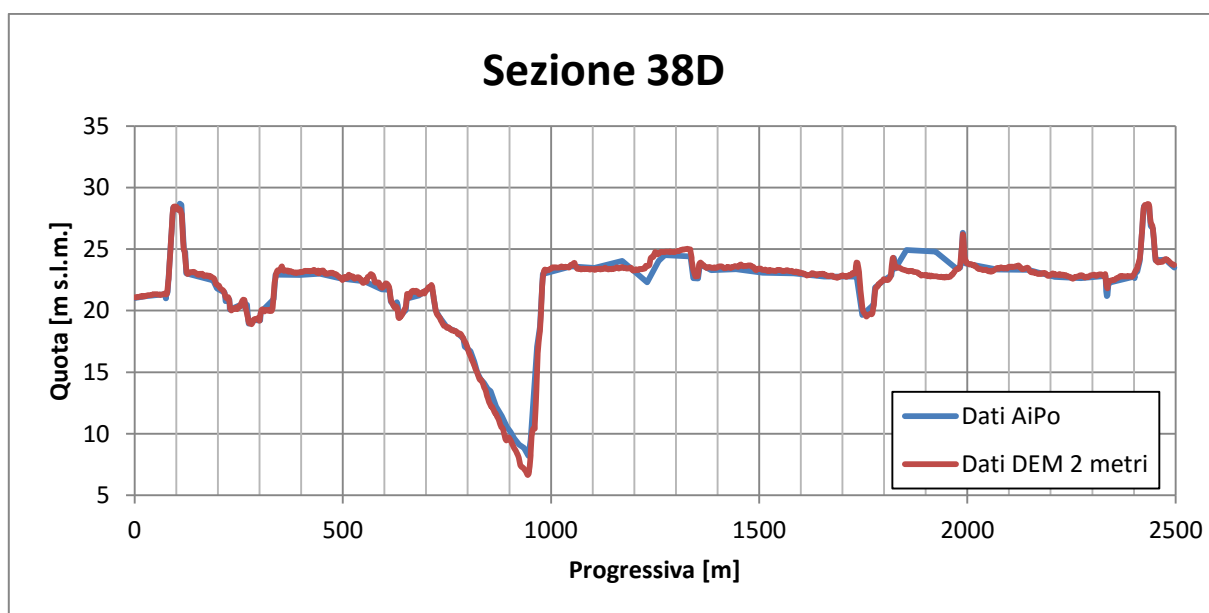


Fig.3.18 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 38D.

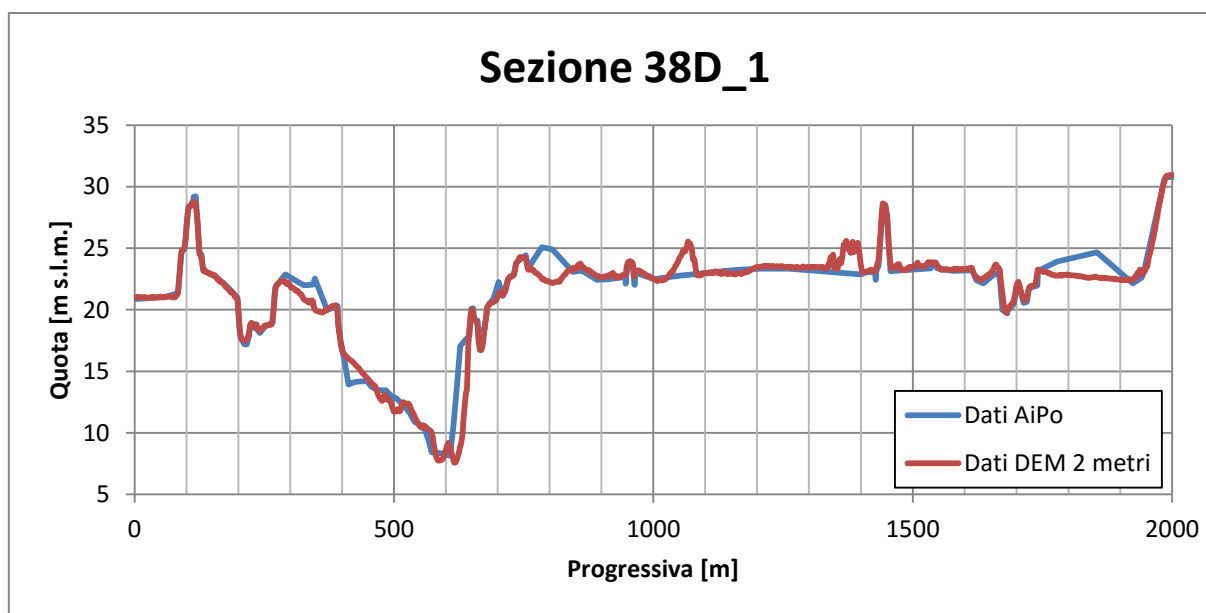


Fig.3.19 Confronto tra i dati a disposizione per la Sezione 38D_1.

3.1.2 Validazione della batimetria a 8 metri

Una volta constatata la corrispondenza tra i rilievi a disposizione è stato necessario effettuare un ulteriore confronto tra i il DEM a 2 metri e una griglia diradata a 8 metri. Infatti, considerando l'ampiezza del dominio di calcolo, l'utilizzo di una griglia uniforme a passo 2 metri comporterebbe la necessità di computare più di 20 milioni di nodi di calcolo, con un dispendio computazionale ed un onere di tempo eccessivi.

Di conseguenza per le applicazioni pratiche si è diradata la griglia da passo 2 a passo 8 metri, con la diminuzione dei nodi di calcolo a poco più di 1 milione.

Tuttavia risulta di conseguenza necessario effettuare un nuovo confronto tra le 2 batimetrie in esame. Come si può constatare dalle figure che rappresentano il confronto tra le precedenti sezioni di interesse (da Fig.3.20 a Fig.3.38), le due batimetrie sono praticamente coincidenti.

Questo è dovuto al fatto che il tratto di Po oggetto di studio presenta una larghezza dell'alveo inciso e una distanza tra le arginature maestre particolarmente elevate (si superano anche i 300 e i 3000 metri rispettivamente per le due distanze).

Di conseguenza un cambiamento di risoluzione come quella descritta in precedenza non ha effetti particolarmente negativi in termini di perdita di dettaglio per distanze così importanti. La batimetria a 8 metri ha, quindi, un livello di dettaglio accettabile.

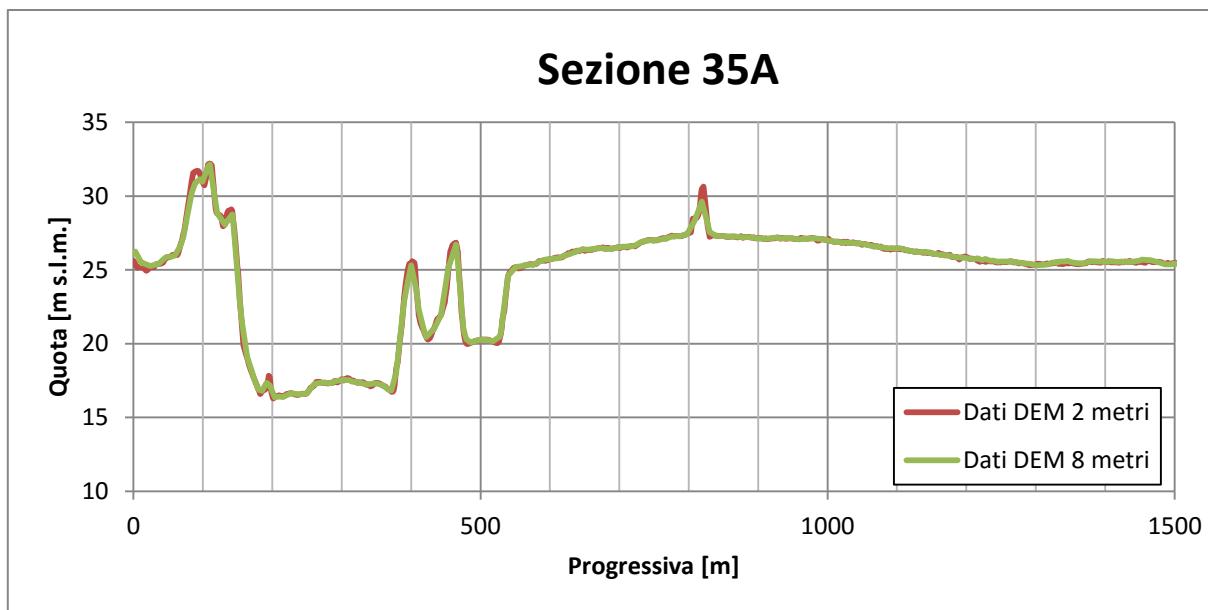


Fig.3.20 Confronto tra i dati per la Sezione 35A.

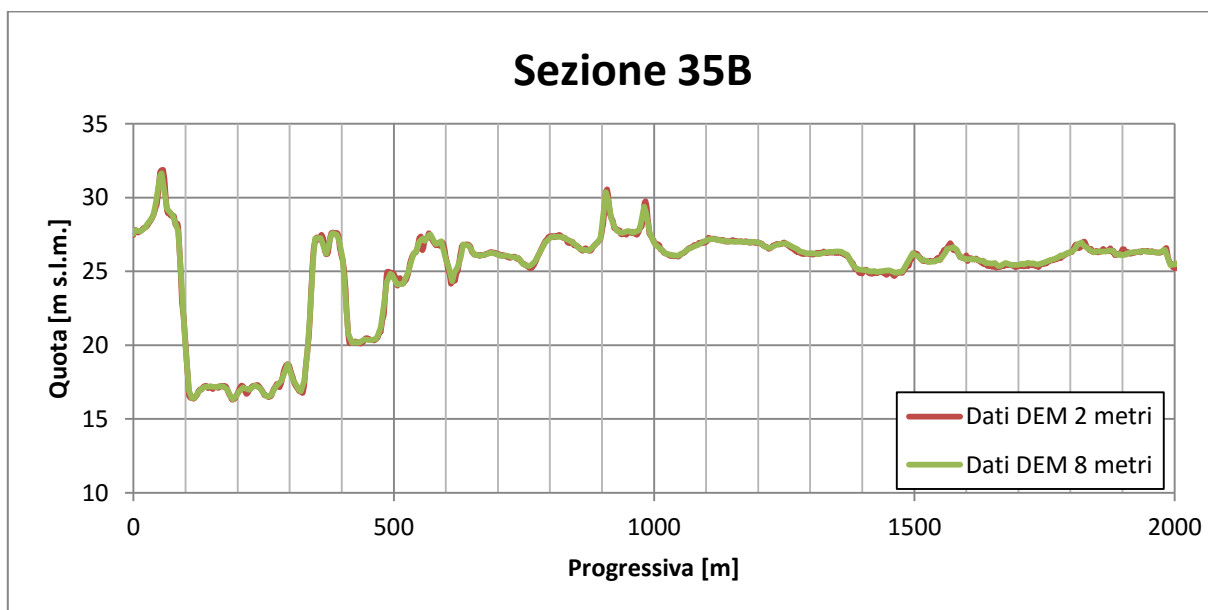


Fig.3.21 Confronto tra i dati per la Sezione 35B.

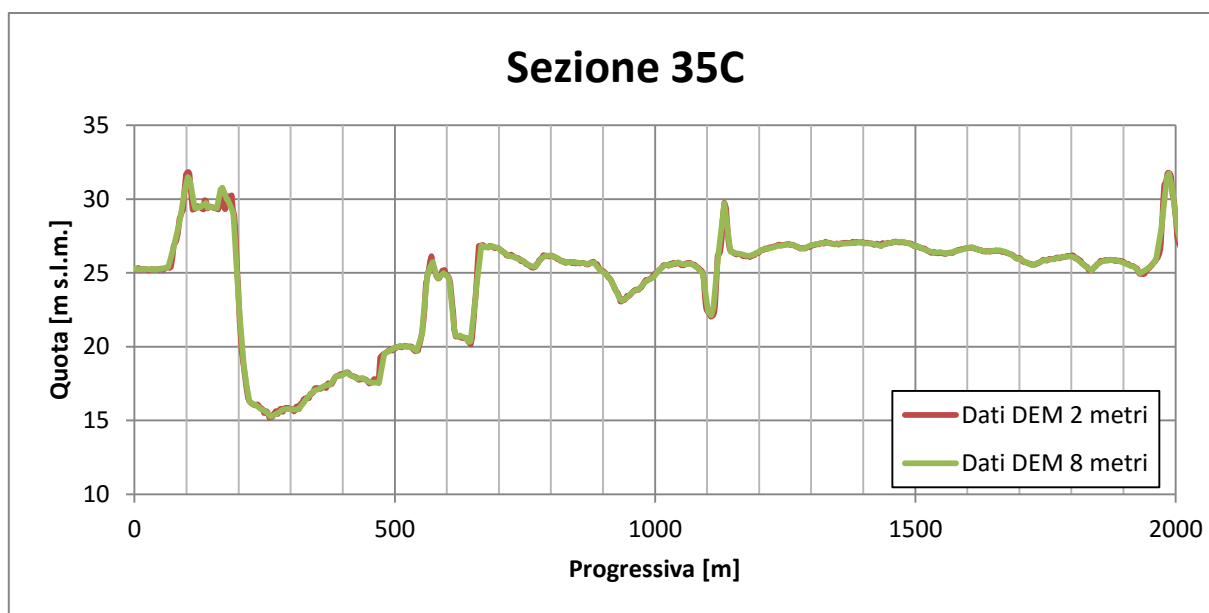


Fig.3.22 Confronto tra i dati per la Sezione 35C.

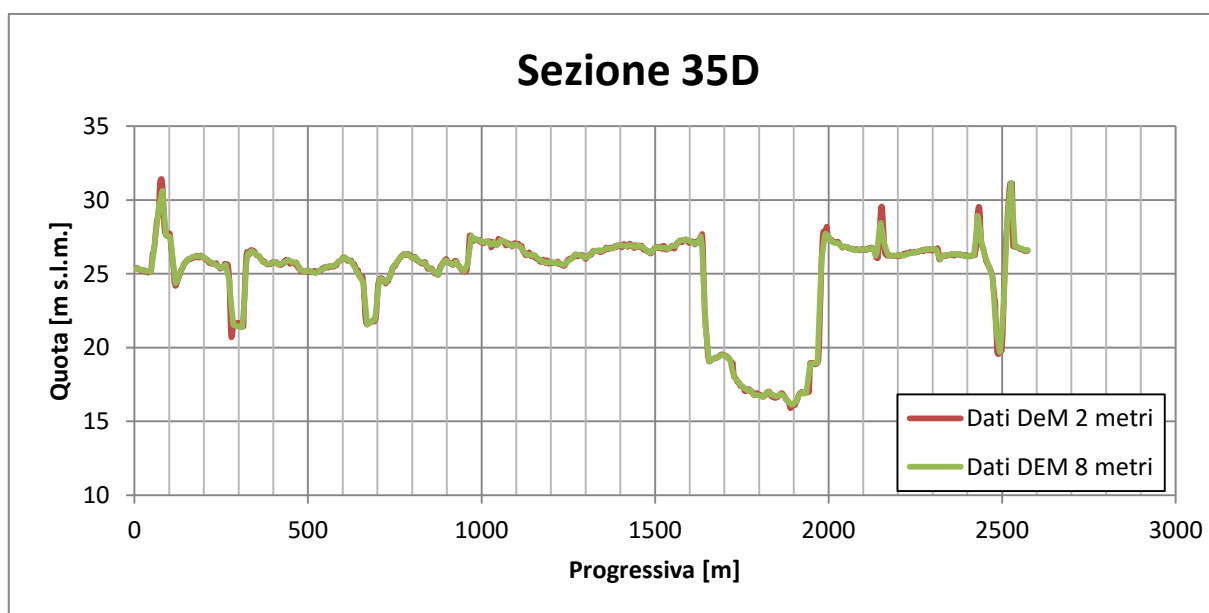


Fig.3.23 Confronto tra i dati per la Sezione 35D.

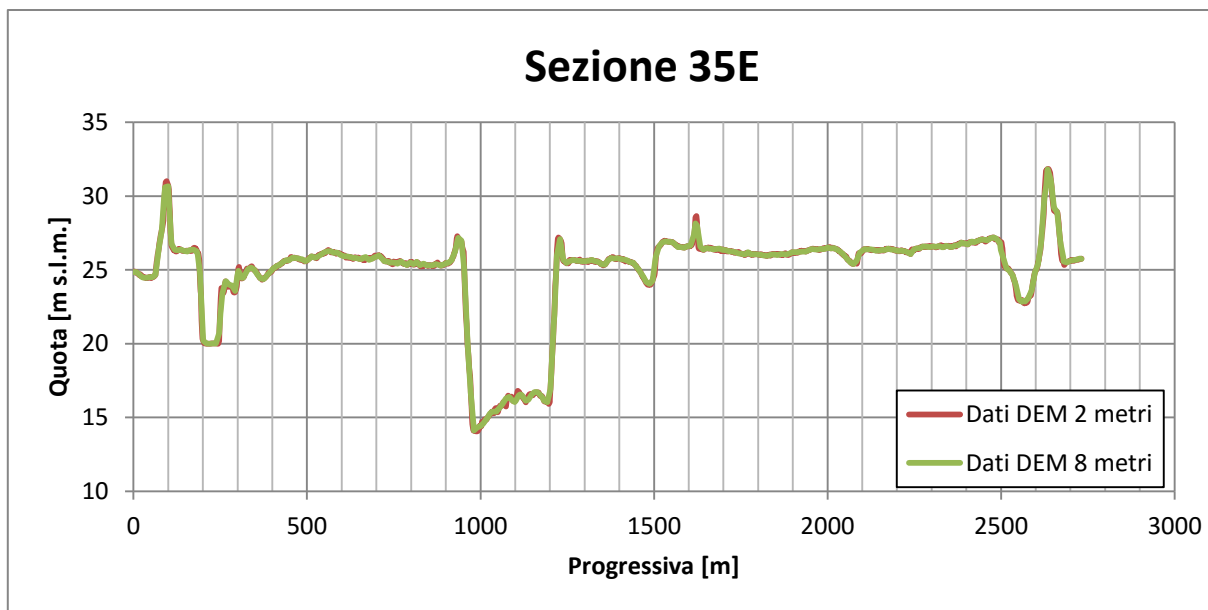


Fig.3.24 Confronto tra i dati per la Sezione 35E.

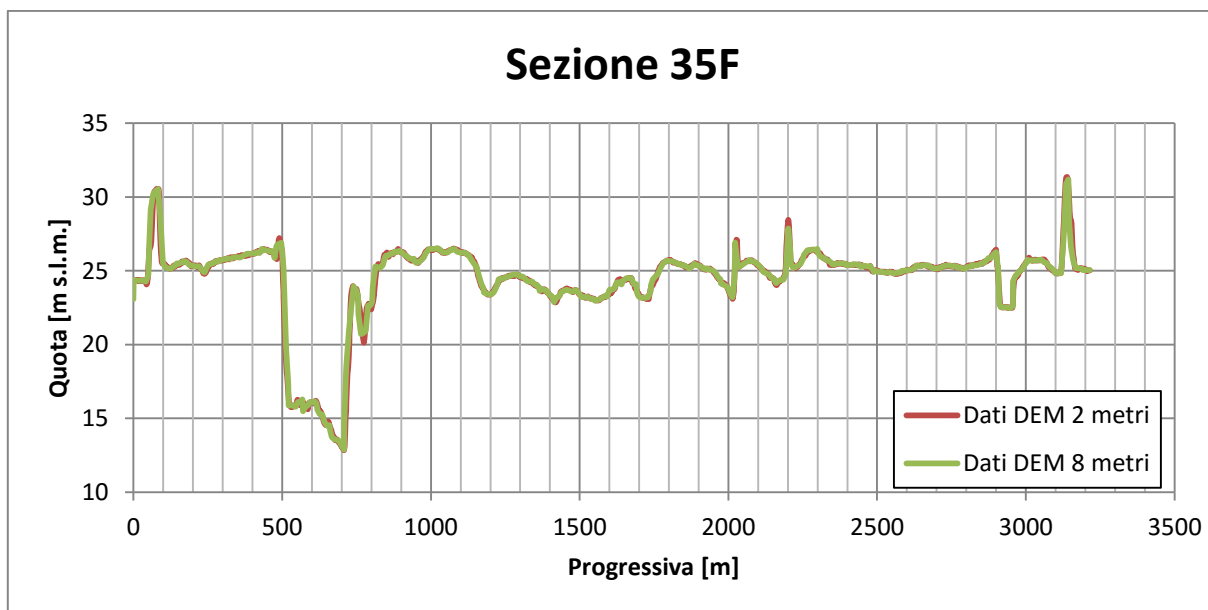


Fig.3.25 Confronto tra i dati per la Sezione 35F.

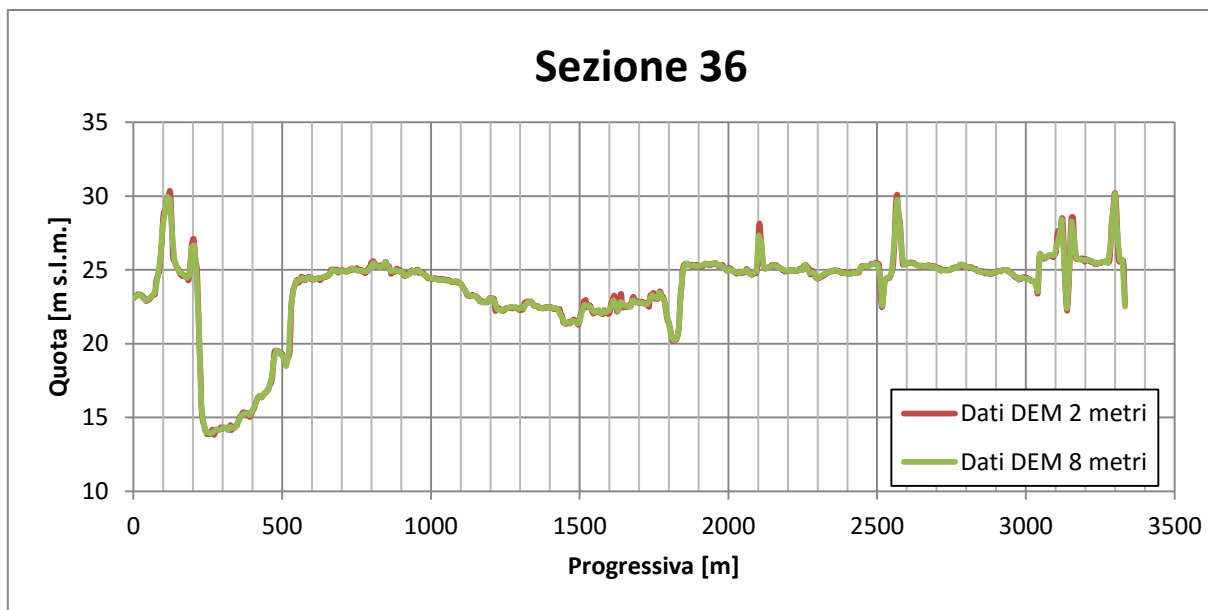


Fig.3.26 Confronto tra i dati per la Sezione 36.

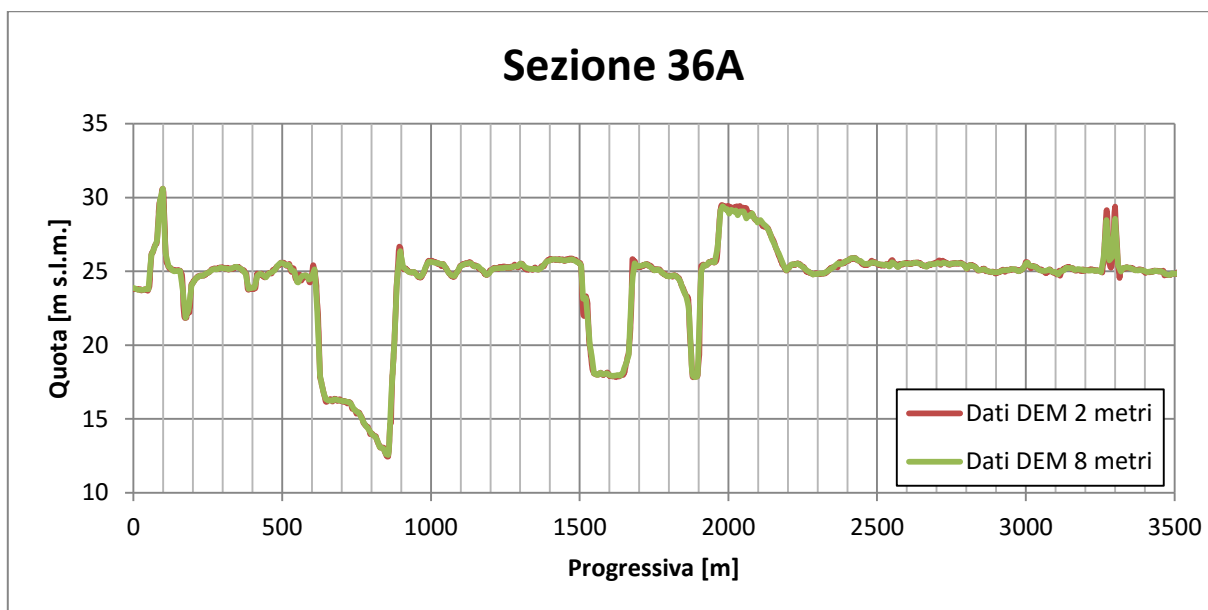


Fig.3.27 Confronto tra i dati per la Sezione 36A.

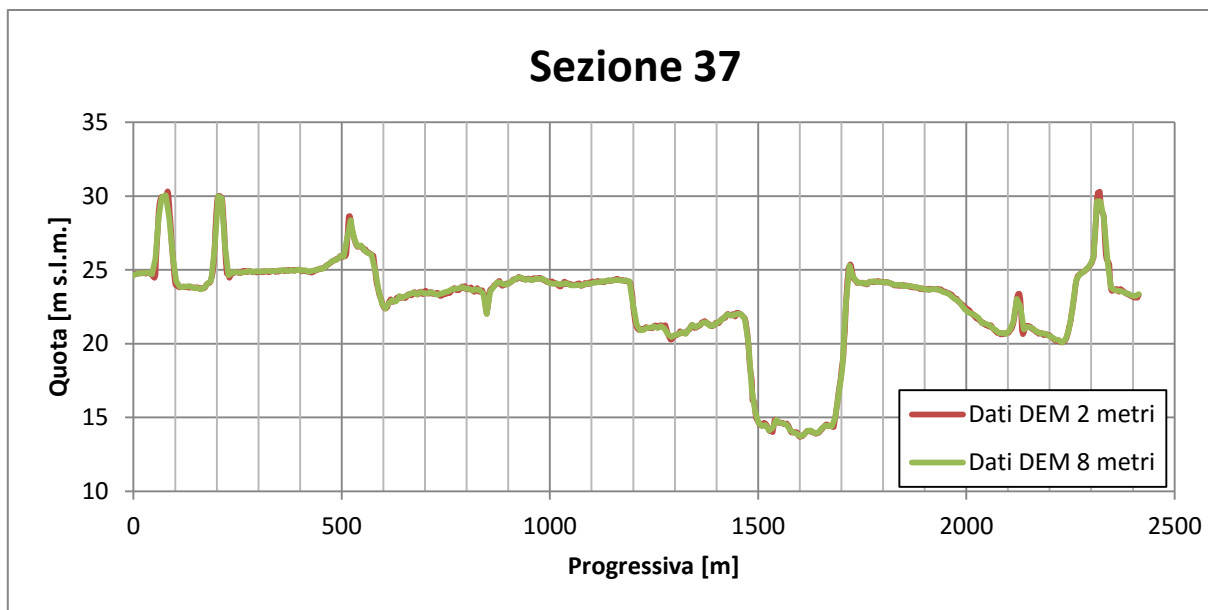


Fig.3.28 Confronto tra i dati per la Sezione 37.

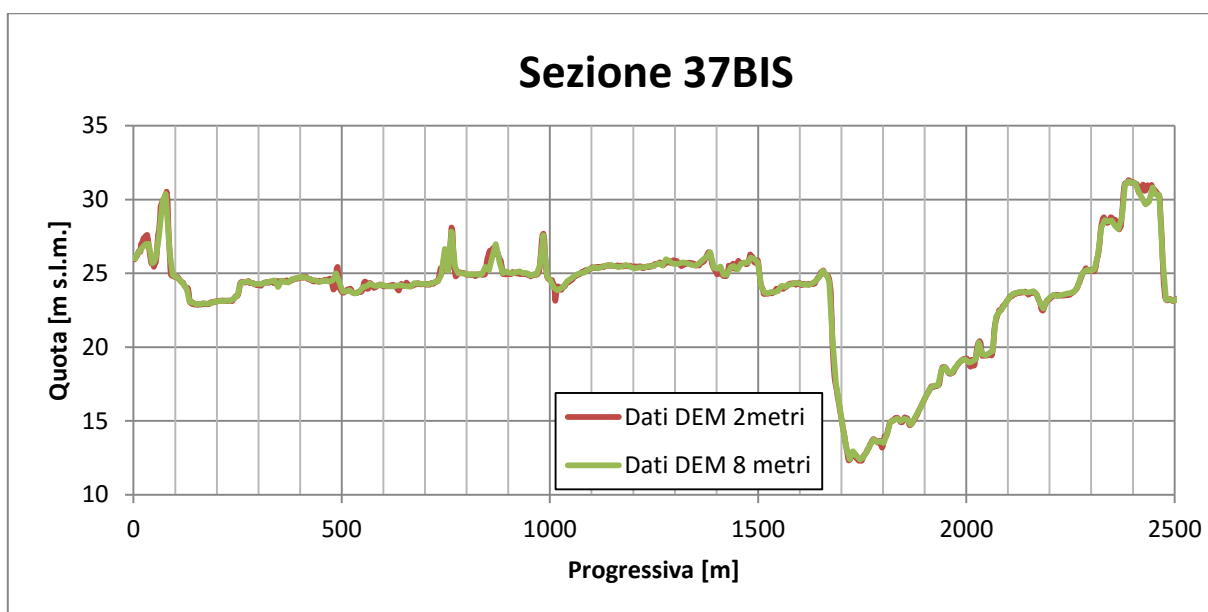


Fig.3.29 Confronto tra i dati per la Sezione 37BIS.

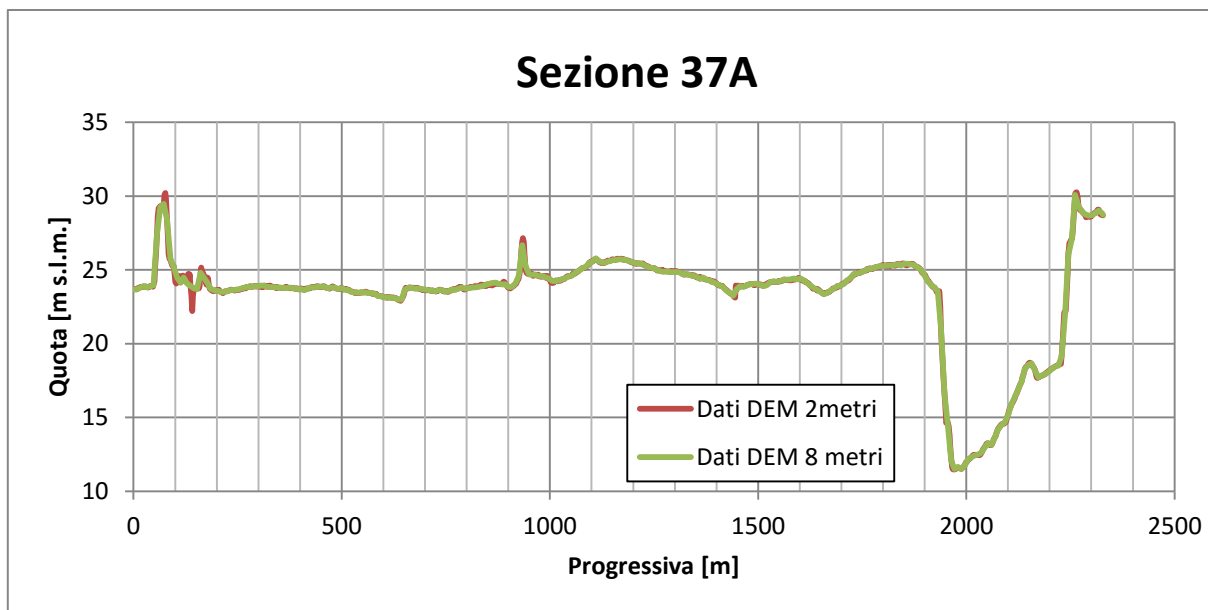


Fig.3.30 Confronto tra i dati per la Sezione 37A.

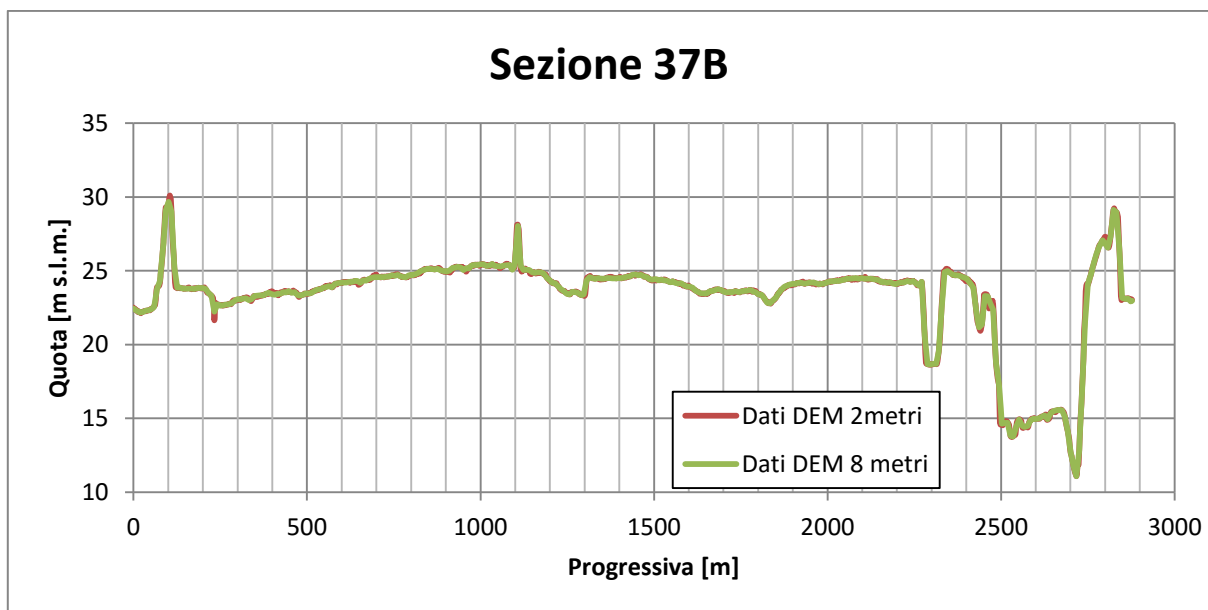


Fig.3.31 Confronto tra i dati per la Sezione 37B.

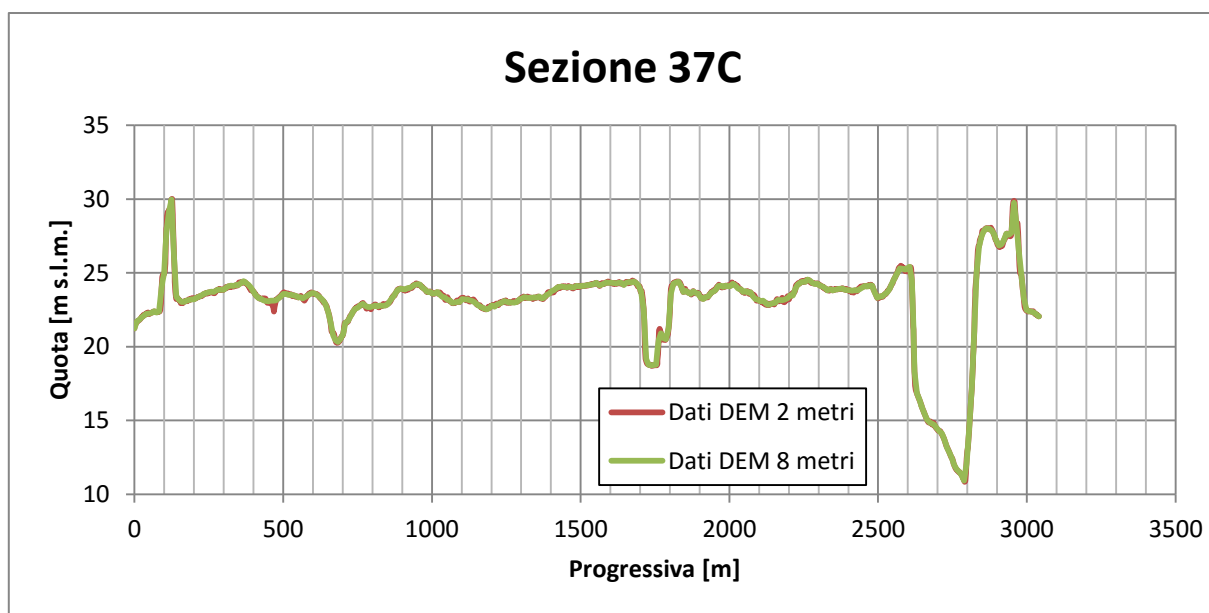


Fig.3.32 Confronto tra i dati per la Sezione 37C.

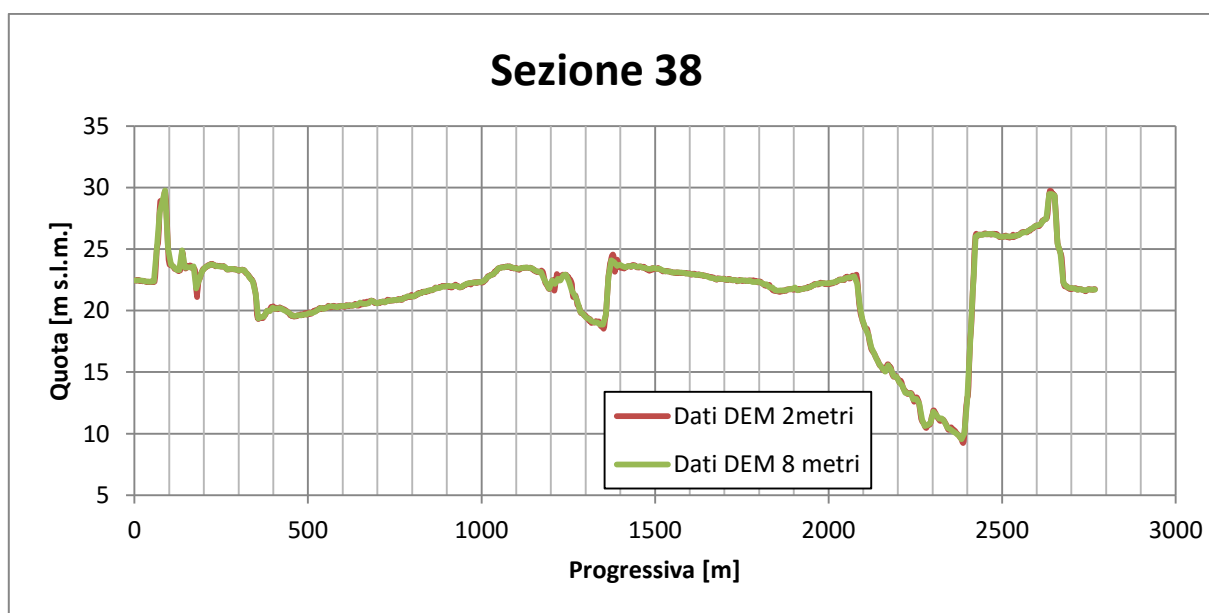


Fig.3.33 Confronto tra i dati per la Sezione 38.

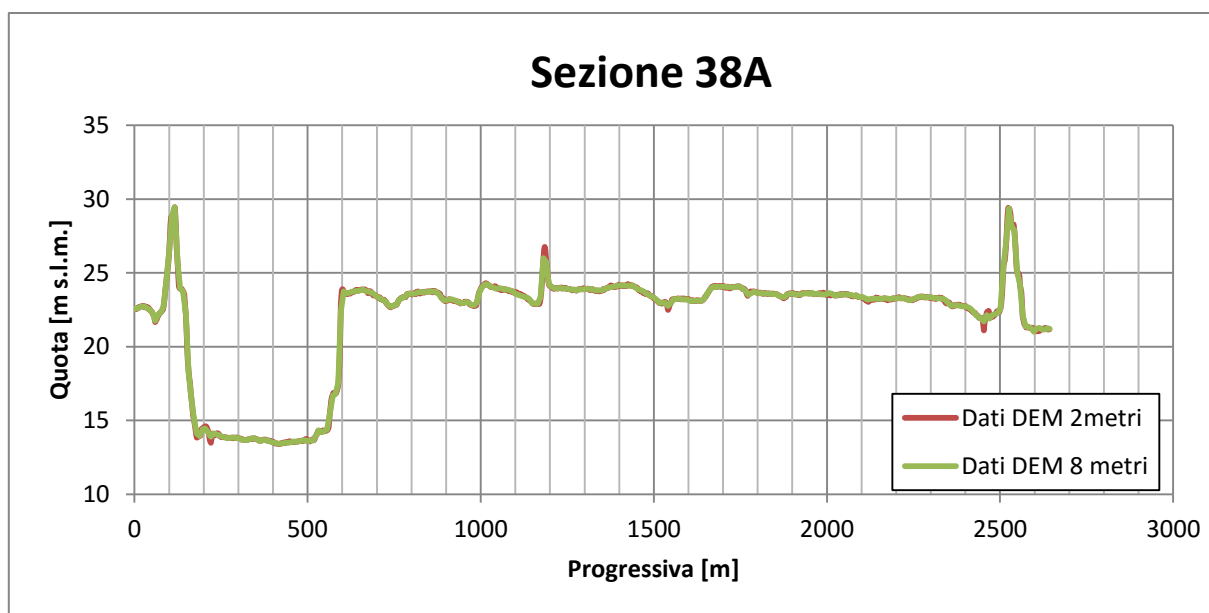


Fig.3.34 Confronto tra i dati per la Sezione 38A.

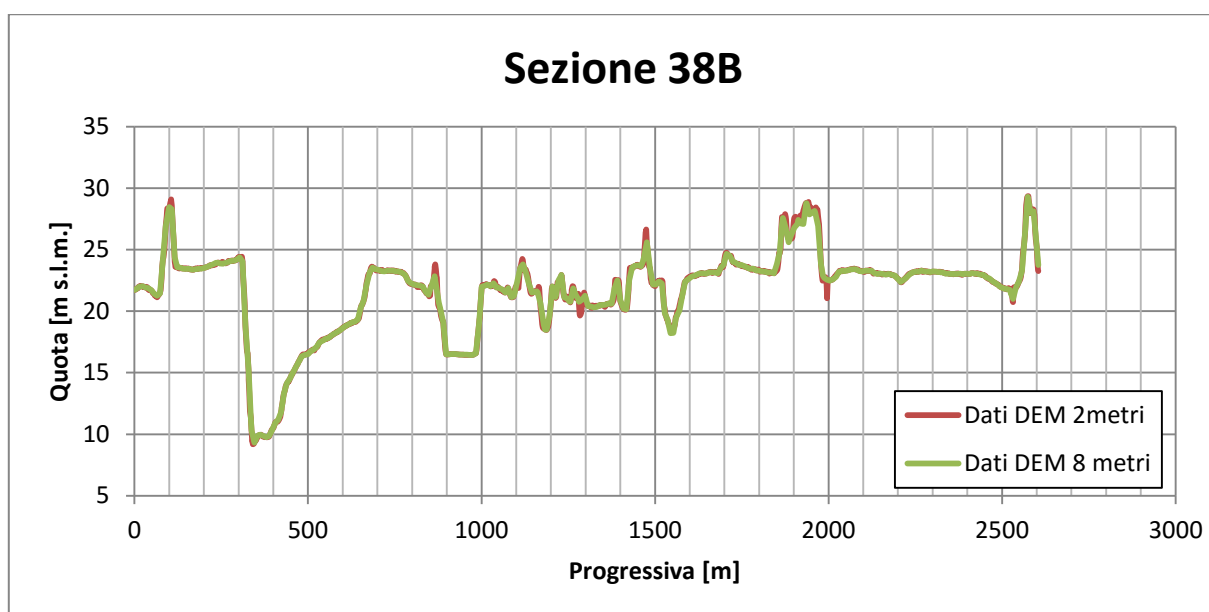


Fig.3.35 Confronto tra i dati per la Sezione 38B.

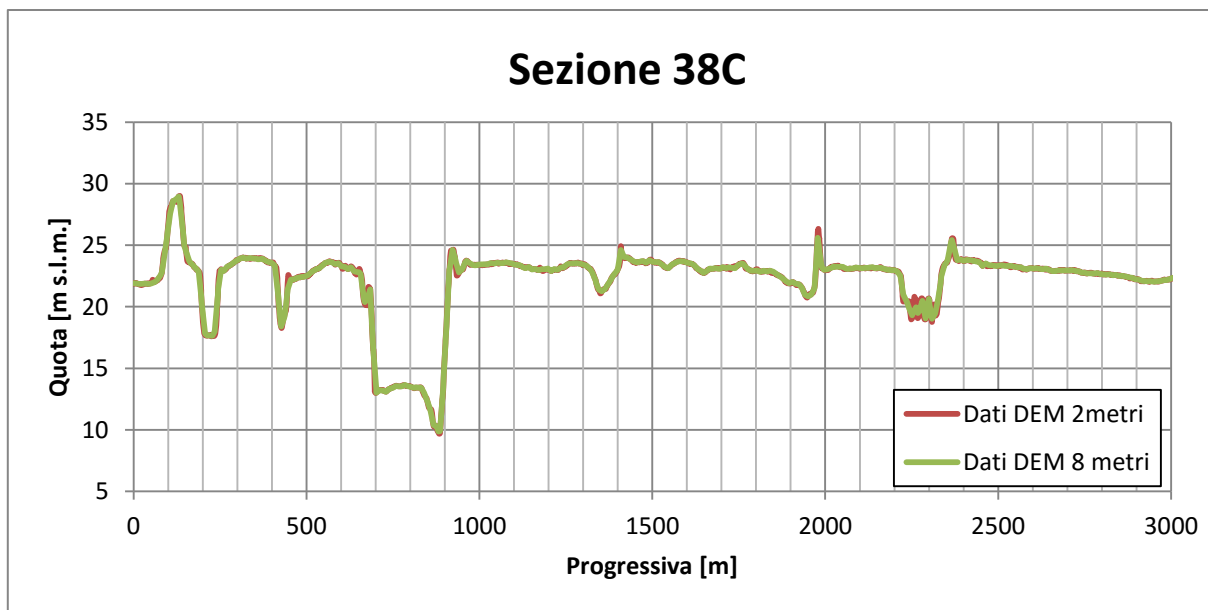


Fig.3.36 Confronto tra i dati per la Sezione 38C.

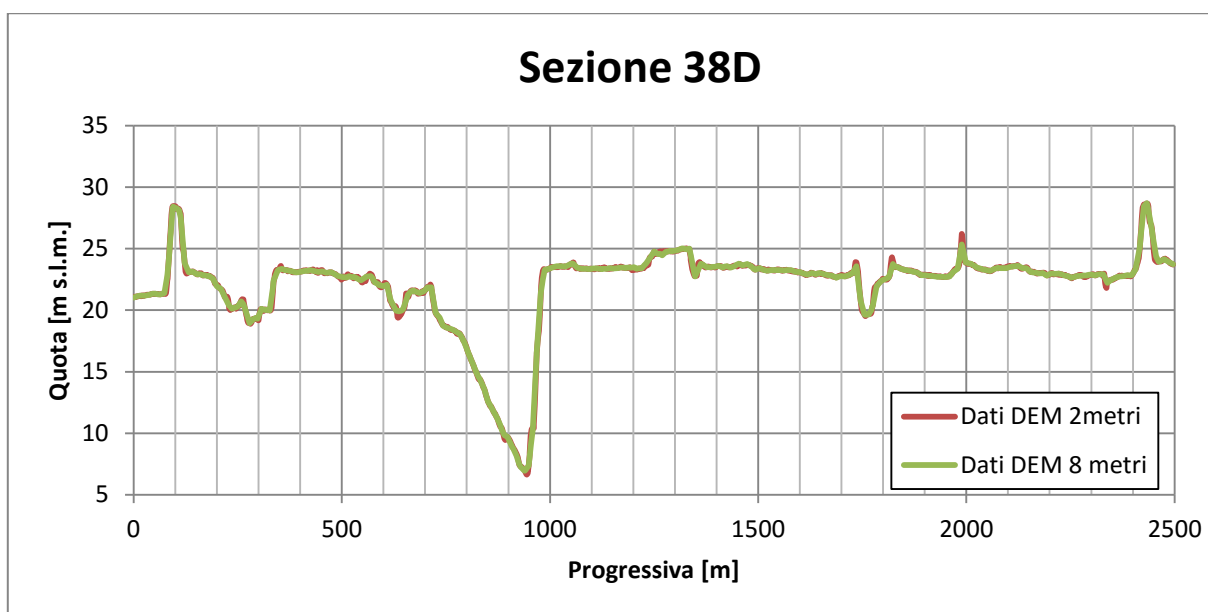


Fig.3.37 Confronto tra i dati per la Sezione 38D.

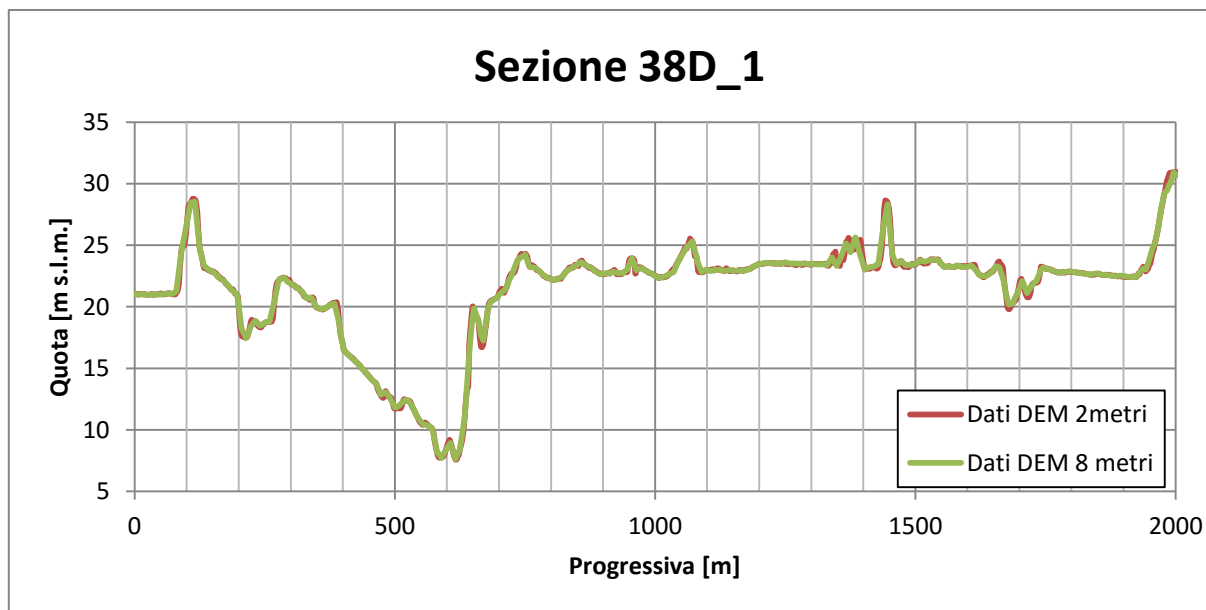


Fig.3.38 Confronto tra i dati per la Sezione 38D_1.

3.1.3 Ripresa dei coronamenti arginali

Una volta constatato che la batimetria a 8 metri presenta un livello di dettaglio accettabile per la vastità del dominio di calcolo, trovando così il giusto compromesso tra minore accuratezza spaziale della soluzione e diminuzione degli oneri computazionali e dei tempi di simulazione, è stato comunque necessario restituire a tutti i coronamenti arginali l'effettiva quota. Questo procedimento si è reso necessario dal momento che in corrispondenza di tutte le arginature si vuole mantenere il massimo livello di dettaglio in quanto questi elementi geometrici entrano direttamente in gioco per lo studio in esame. Al fine quindi di mantenere inalterate le quote del coronamento delle arginature maestre e delle arginature golenali è stata seguita una procedura implementata con l'ausilio del software *Matlab*.

In primo luogo si sono ripresi gli argini a partire dalla batimetria a passo 2 metri.

Per realizzare questo procedimento è necessario fornire al programma i seguenti di dati:

- Un file .BLN con le coordinate X, Y, Z delle arginature golenali e maestre riprese attraverso il comando *Digitize* su *Surfer* (vedi Fig.3.39 in cui sono evidenziate tutte le arginature riprese);
- La batimetria a passo 2 metri da cui sono stati estratti i coronamenti;
- La batimetria a passo 8 metri a cui devono essere inseriti i coronamenti.

In output si ottiene la batimetria a passo 8 metri ma con gli argini ripresi dalle quote della batimetria a 2 metri.



Fig.3.39 Le arginature riprese dalla batimetria a passo 2 metri.

Successivamente si è nuovamente provveduto a riprendere gli argini maestri e golenali per le ultime simulazioni (in totale 29 argini ripresi) utilizzando i dati forniti dall'AIPo relativi al "Rilievo topografico profili arginali evento di piena novembre 2014 del fiume Po". In Fig.3.40 sono evidenziate le arginature rilevate nel 2014 e riprese grazie al software *Matlab* secondo un procedimento analogo a quello descritto in precedenza. Le arginature si considerano dunque riprese esaustivamente.

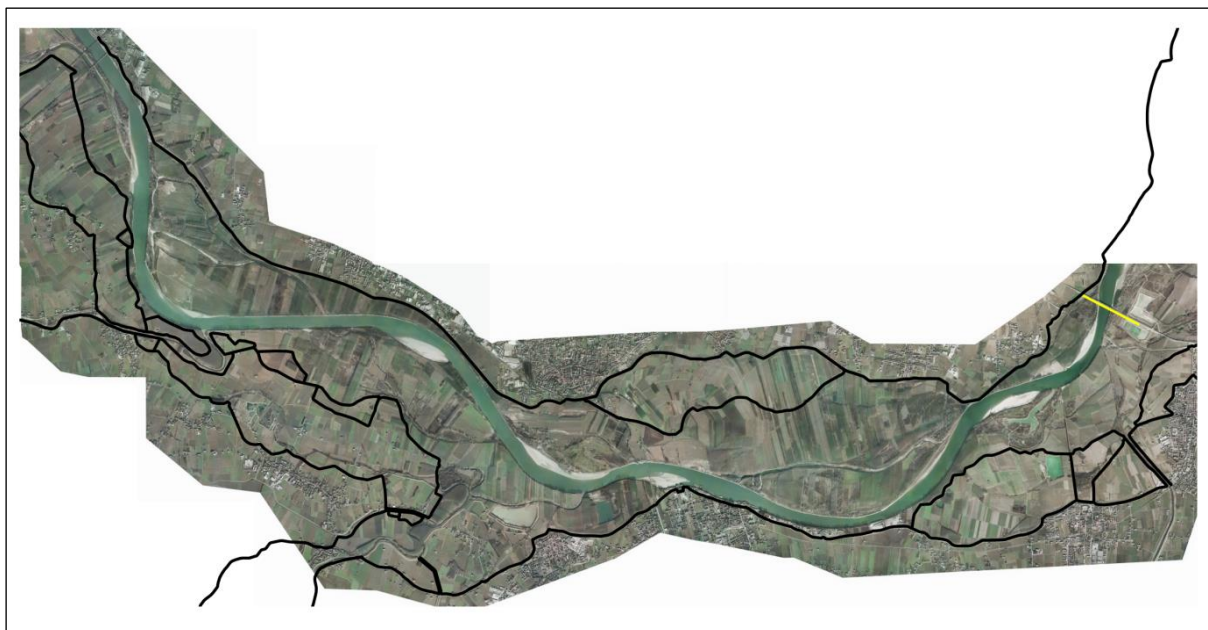


Fig.3.40 Le arginature riprese dal rilievo dell'AIPo ([2]).

3.1.4 Rilievo dell'argine consortile

Infine, per descrivere con maggiore dettaglio e un livello di precisione più elevato la golenale di interesse, si è provveduto ad effettuare il rilievo dell'arginatura consortile della golenale stessa (evidenziata in rosso in *Fig.3.41*).

Le misurazioni sono state effettuate in tre giornate differenti (5, 6 e 8 maggio 2016) e sono state realizzate con un metodo tradizionale che ha previsto l'utilizzo di stadie e di livello laser, con la necessità di appoggiarsi su capisaldi noti presenti sull'arginatura: il punto di partenza è stato scelto in corrispondenza del basamento della chiavica di Scutellara-Canalazzo (vedi *Foto 3.1*) che si posiziona ad una quota altimetrica conosciuta di 29.75 m s.l.m., in corrispondenza della progressiva 1200 m a partire dall'innesto di Coenzo a monte.

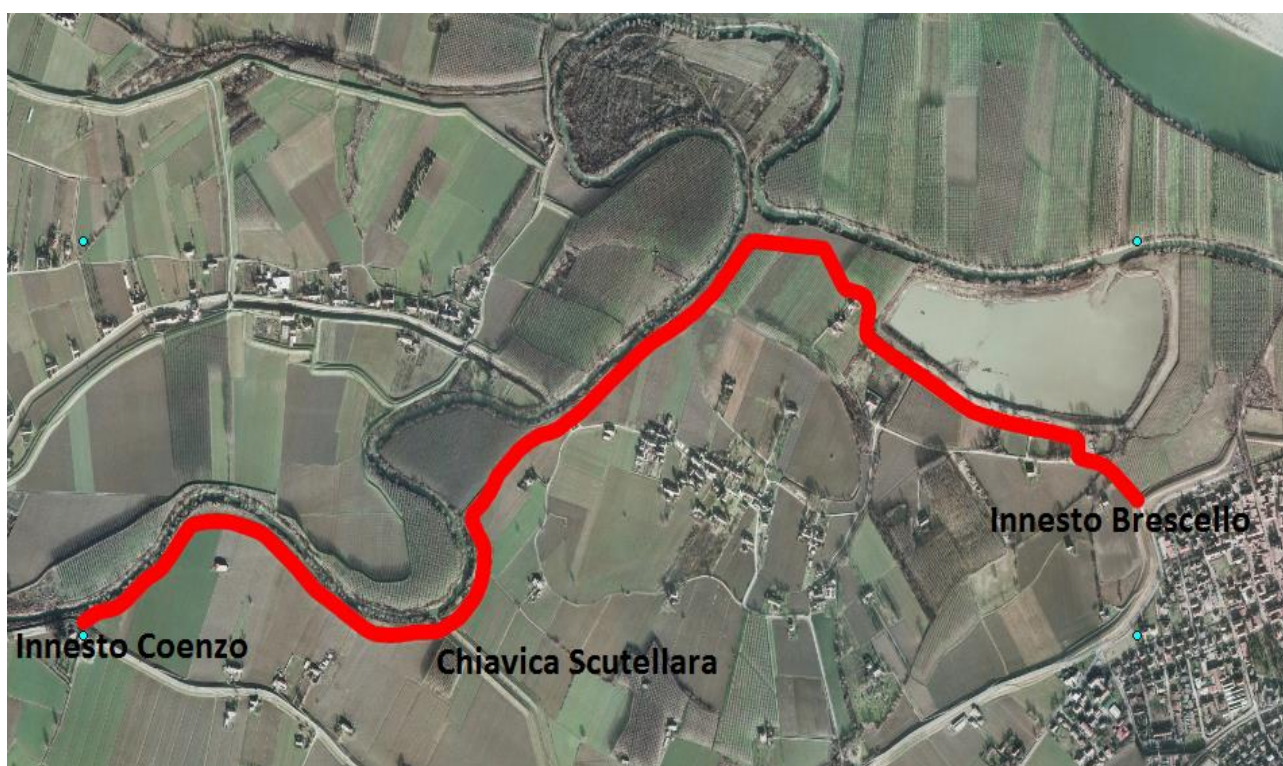


Fig.3.41 Fotografia aerea e individuazione dell'argine golenale oggetto di rilievo.



Foto 3.1 Chiavica di Scutellara – Canalazzo e punto con quota altimetrica nota.

La strumentazione utilizzata è visibile in *Foto 3.2* (livello laser) e in *Foto 3.3* (una delle stadie graduate e allungabili).

Il rilievo è stato effettuato sotto la sponsorizzazione del *Consorzio Unico di Difesa Terre Golenali del Comune di Brescello* (vedi *Foto 3.4*) anche per potere avere l'autorizzazione di stazionare con mezzi a motore sull'argine consortile in via del tutto straordinaria; percorrere tale argine con mezzi a motore è oggi infatti vietato da 3 diverse leggi e statuti:

1. Statuto Consorzio di Difesa Terre Golenali del Comune di Brescello, Edizione settembre 2009, Articolo 24, Comma 1: “È vietato percorrere e/o stazionare con qualsiasi tipo di veicolo a motore sulle sommità e sulle scarpate arginali senza specifica autorizzazione del Consorzio”;
2. Regio Decreto, 25 luglio 1904 n. 523: “Allorché le amministrazioni o i privati si rifiutassero di assumere la manutenzione delle sommità arginali ad uso strada, o non la eseguissero dopo averla assunta, i corrispondenti tratti di d'argine verranno interclusi con proibizione del transito”;
3. Legge Regionale, 7 novembre 2012, n.11, Titolo IV, Capo I, Articolo 25, Lettera f: “Per le violazioni alle disposizioni contenute nella presente legge e nelle relative forme d'attuazione, ove il fatto non costituisca reato, si applicano

le seguenti sanzioni amministrative: [...] accesso motorizzato alle sommità arginali prive di strade rotabili e agli alvei di magra di canali e corsi d'acqua con veicoli diversi dai ciclomotori sino a 50 cc di cilindrata: da euro 50,00 a euro 300,00”.



Foto 3.2 Modello del livello laser utilizzato.



Foto 3.3 Una delle stadiie graduate e allungabili utilizzate.



Foto 3.4 Uno dei mezzi a motore abilitati a percorrere l'arginatura consortile.

Il procedimento seguito è stato tradizionale: con l'ausilio di una serie di tavole si è percorso tutto lo sviluppo arginale prelevando le quote altimetriche ad una distanza costante pari a 20 metri (per alcuni punti notevoli e di importanza storicamente nota si è provveduto a diminuire tale distanza per avere un maggior numero di dati a disposizione). In tal modo è stato possibile ottenere un totale di 216 misurazioni su circa 4 km di sviluppo arginale che descrivono il profilo altimetrico dello stesso (vedi *Tab.3.1* e *Tab.3.2*).

| Progressiva Da Coenzo [m] | Quota altimetrica [m s.l.m.] | Progressiva Da Coenzo [m] | Quota altimetrica [m s.l.m.] | Progressiva Da Coenzo [m] | Quota altimetrica [m s.l.m.] | Progressiva Da Coenzo [m] | Quota altimetrica [m s.l.m.] |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Innesto Coenzo | 30.71 | 500 | 29.75 | 1040 | 29.64 | 1520 | 29.65 |
| 0 | 29.60 | 520 | 29.64 | 1060 | 29.66 | 1540 | 29.70 |
| 5 | 29.53 | 540 | 29.67 | 1080 | 29.69 | 1560 | 29.69 |
| 20 | 29.72 | 560 | 29.68 | 1100 | 29.63 | 1580 | 29.74 |
| 40 | 29.66 | 580 | 29.61 | 1120 | 29.49 | 1600 | 29.73 |
| 60 | 29.62 | 600 | 29.67 | 1140 | 29.45 | 1620 | 29.80 |
| 80 | 29.74 | 620 | 29.74 | 1160 | 29.30 | 1640 | 29.74 |
| 100 | 29.65 | 640 | 29.70 | 1180 | 29.47 | 1660 | 29.76 |
| 120 | 29.55 | 660 | 29.71 | 1200 | 29.42 | 1680 | 29.74 |
| 140 | 29.71 | 680 | 29.70 | 1210 | 29.36 | 1700 | 29.69 |
| 160 | 29.72 | 700 | 29.69 | 1220 | 29.36 | 1720 | 29.67 |
| 180 | 29.74 | 720 | 29.69 | 1240 | 29.49 | 1740 | 29.66 |
| 200 | 29.76 | 740 | 29.65 | 1250 | 29.48 | 1760 | 29.68 |
| 220 | 29.81 | 760 | 29.62 | 1260 | 29.47 | 1780 | 29.67 |
| 240 | 29.68 | 780 | 29.71 | 1280 | 29.50 | 1800 | 29.71 |
| 260 | 29.68 | 800 | 29.86 | 1300 | 29.49 | 1820 | 29.66 |
| 280 | 29.72 | 820 | 29.83 | 1320 | 29.56 | 1840 | 29.59 |
| 300 | 29.70 | 840 | 29.77 | 1340 | 29.56 | 1855 | 29.59 |
| 320 | 29.85 | 860 | 29.82 | 1360 | 29.52 | 1860 | 29.59 |
| 340 | 29.83 | 880 | 29.68 | 1380 | 29.46 | 1880 | 29.58 |
| 360 | 29.65 | 900 | 29.62 | 1400 | 29.44 | 1900 | 29.63 |
| 380 | 29.67 | 920 | 29.56 | 1420 | 29.52 | 1920 | 29.79 |
| 400 | 29.70 | 940 | 29.62 | 1440 | 29.45 | 1940 | 29.77 |
| 420 | 29.69 | 960 | 29.51 | 1460 | 29.58 | 1960 | 29.69 |
| 440 | 29.65 | 980 | 29.47 | 1480 | 29.71 | 1980 | 29.70 |
| 460 | 29.60 | 1000 | 29.53 | 1485 | 29.70 | 2000 | 29.63 |
| 480 | 29.62 | 1020 | 29.56 | 1500 | 29.73 | 2020 | 29.61 |

Tab.3.1 Sviluppo altimetrico dell'argine consortile (primo tratto).

| Progressiva Da Coenzo [m] | Quota altimetrica [m s.l.m.] | Progressiva Da Coenzo [m] | Quota altimetrica [m s.l.m.] | Progressiva Da Coenzo [m] | Quota altimetrica [m s.l.m.] | Progressiva Da Coenzo [m] | Quota altimetrica [m s.l.m.] |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 2040 | 29.66 | 2560 | 29.46 | 3020 | 29.57 | 3520 | 29.38 |
| 2060 | 29.64 | 2580 | 29.58 | 3040 | 29.86 | 3540 | 29.44 |
| 2080 | 29.71 | 2600 | 29.56 | 3060 | 29.71 | 3560 | 29.62 |
| 2100 | 29.61 | 2620 | 29.56 | 3080 | 29.69 | 3580 | 29.60 |
| 2120 | 29.63 | 2640 | 29.67 | 3100 | 29.68 | 3600 | 29.53 |
| 2140 | 29.67 | 2654 | 29.67 | 3120 | 29.65 | 3620 | 29.46 |
| 2160 | 29.65 | 2660 | 29.74 | 3140 | 29.81 | 3640 | 29.56 |
| 2180 | 29.65 | 2680 | 29.71 | 3160 | 29.72 | 3660 | 29.56 |
| 2200 | 29.80 | 2700 | 29.82 | 3180 | 29.59 | 3680 | 29.63 |
| 2220 | 29.67 | 2720 | 29.76 | 3200 | 29.56 | 3700 | 29.66 |
| 2240 | 29.69 | 2726 | 29.79 | 3220 | 29.56 | 3720 | 29.56 |
| 2260 | 29.64 | 2750 | 29.71 | Chiavica 2 | 29.99 | 3740 | 29.46 |
| 2280 | 29.62 | 2760 | 29.68 | 3240 | 29.64 | 3760 | 29.41 |
| 2300 | 29.47 | 2780 | 29.68 | 3260 | 29.71 | 3775 | 28.96 |
| 2302 | 29.42 | 2800 | 29.55 | 3280 | 29.55 | 3780 | 29.08 |
| 2320 | 29.59 | 2820 | 29.60 | 3300 | 29.54 | 3800 | 29.34 |
| 2340 | 29.62 | 2840 | 29.53 | Caposaldo | 30.56 | 3811 | 29.02 |
| 2360 | 29.65 | 2860 | 29.60 | 3320 | 29.51 | 3820 | 29.00 |
| 2380 | 29.57 | 2872 | 29.61 | 3340 | 29.51 | 3840 | 29.15 |
| 2400 | 29.63 | 2880 | 29.57 | 3360 | 29.42 | 3860 | 29.34 |
| 2420 | 29.56 | 2900 | 29.57 | 3380 | 29.44 | 3880 | 29.38 |
| 2440 | 29.58 | 2927 | 29.54 | 3400 | 29.45 | 3900 | 29.44 |
| 2460 | 29.61 | 2940 | 29.57 | 3420 | 29.43 | 3920 | 29.57 |
| 2480 | 29.60 | 2960 | 29.63 | 3440 | 29.33 | 3940 | 29.73 |
| 2500 | 29.59 | 2980 | 29.53 | 3460 | 29.34 | Sella Brescello | 30.27 |
| 2520 | 29.60 | 3000 | 29.55 | 3480 | 29.37 | Maestro Brescello | 30.30 |
| 2540 | 29.50 | 3014 | 29.55 | 3500 | 29.34 | | |

Tab.3.2 Sviluppo altimetrico dell'argine consortile (ultimo tratto).

In *Fig.3.42* è riportato l'andamento del sviluppo altimetrico dell'argine consortile di Ghiarole ricavato da questo rilievo del maggio 2016, confrontato con quello realizzato nel 2014 dall'AIPo. L'andamento è molto simile e le quote si discostano di pochi centimetri. Nel presente studio si è scelto di utilizzare le quote del rilievo del maggio 2016 in quanto più recenti, nonché realizzate appositamente per lo specifico scopo del lavoro di tesi.

Per una completezza di dati si è anche provveduto a realizzare il rilievo di un totale di 17 sezioni in punti notevoli, delle quali 4 sono state picchettate per successivi studi di carattere geologico-geotecnico relativi ai fenomeni di sifonamento ed imbibizione dell'arginatura stessa. Nella *Foto3.5* è possibile osservare la picchettatura di una sezione trasversale.

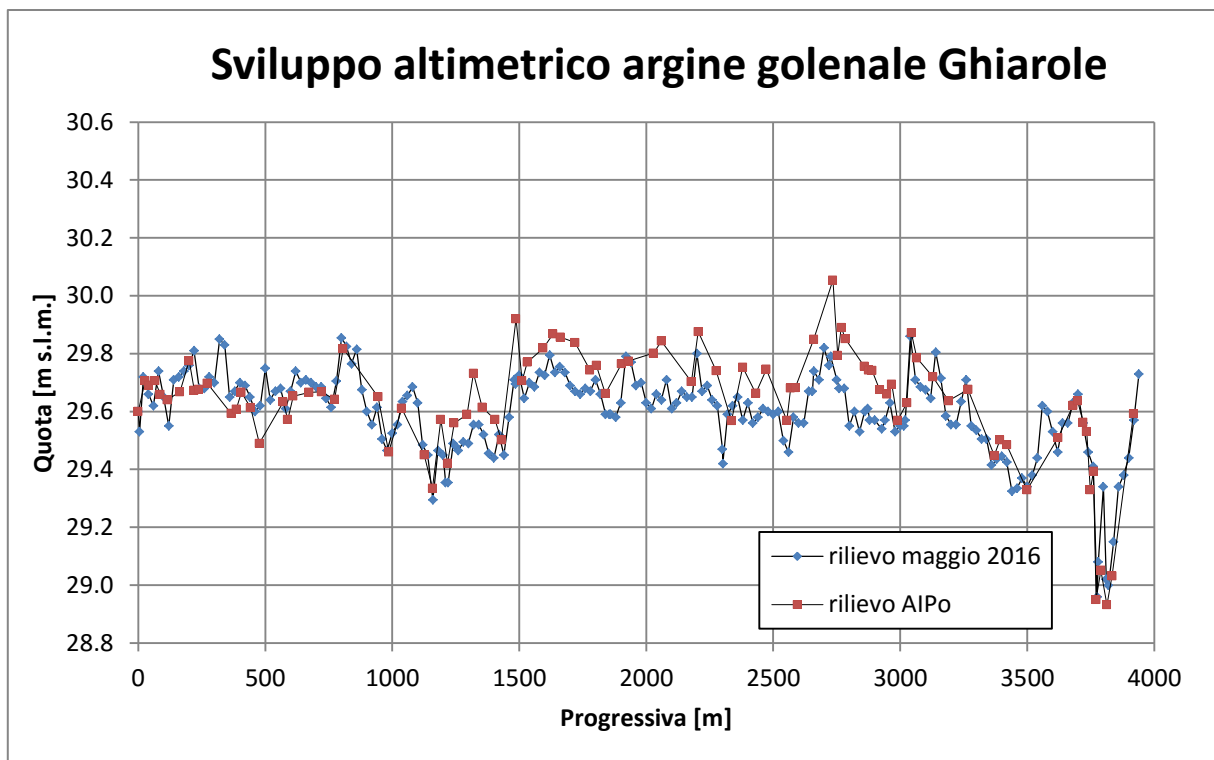


Fig.3.42 Sviluppo altimetrico argine golenale di Ghiarole.



Foto 3.5 Picchettatura di una sezione trasversale.

3.1.5 Batimetria utilizzata nel presente studio

Gli ultimi due passaggi necessari per la definizione conclusiva della batimetria sono stati relativi a:

- Chiusura delle chiaviche presenti nel dominio di calcolo con il comando *Blank* su *Surfer*: si ipotizza infatti che in caso di piena le chiaviche vengano ovunque ragionevolmente chiuse;
- Ripresa dell'arginatura consortile a seguito del rilievo del maggio 2016 modificando la quota di ciascun punto dell'argine stesso per portarlo alla quota corretta attuale.

In tal modo si è quindi ottenuto il file .BTM rappresentato mediante il programma *Surfer* in Fig.3.43 e utilizzato per tutte le simulazioni finali.

Il file .BTM è inoltre caratterizzato da dimensioni precise, che devono essere riprese e rispettate da alcuni dei successivi file di input. Tali dimensioni definiscono l'estensione del dominio di calcolo nei confronti del sistema di coordinate utilizzato (sistema di coordinate *ED50*) e sono le seguenti:

X minimo: 610674 m;

X massimo: 630674 m;

Y minimo: 4972248 m;

Y massimo: 4982048 m.

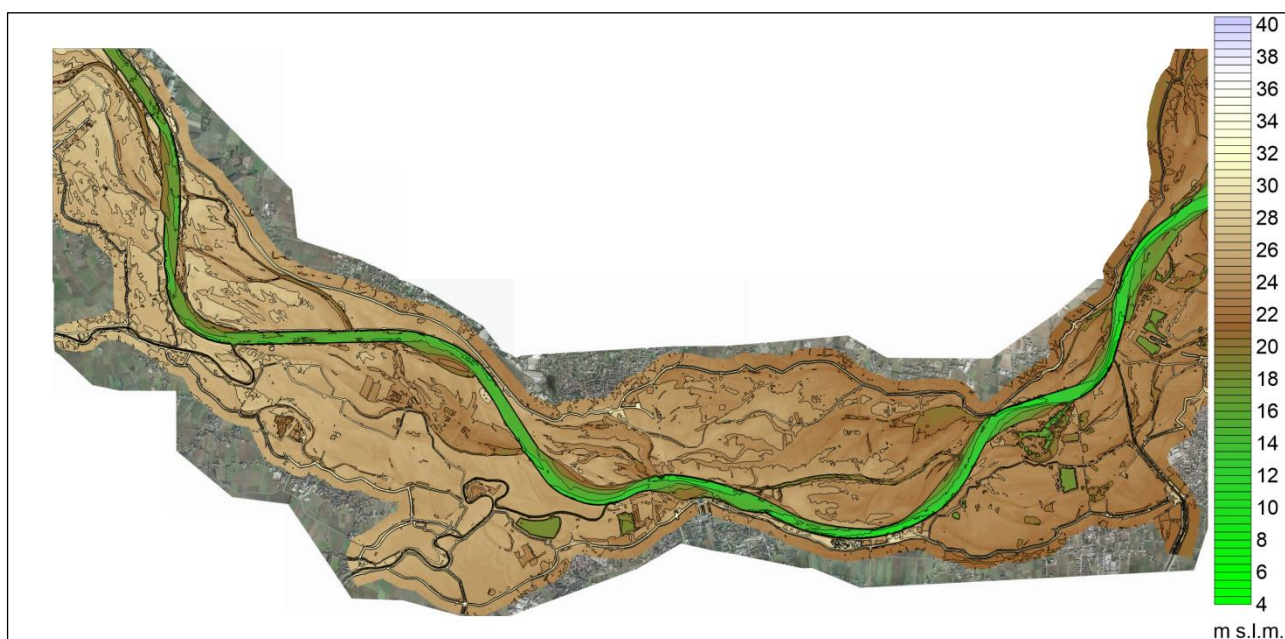


Fig.3.43 Batimetria utilizzata.

3.2 Scabrezza

Un ulteriore file di input necessario è quello che descrive la scabrezza della zona in esame (file .MAN). Questo file attribuisce un valore del coefficiente di scabrezza di Manning n a ciascuna cella di calcolo.

3.2.1 Espressione del coefficiente di scabrezza

Il coefficiente di scabrezza serve per determinare, all'interno di un corso d'acqua, la resistenza al moto fornita dai materiali che compongono l'alveo stesso, dalla copertura vegetale e, in genere, dalle aree golenali eventualmente interessate dal flusso. La scabrezza idraulica rappresenta dunque il parametro che regola le perdite di energia distribuite. Sotto l'ipotesi di moto assolutamente turbolento, la cadente può essere espressa dalla relazione [5.1]:

$$J = \frac{V^2}{\chi^2 R} \quad [-] \quad [3.1]$$

Nella espressione [5.1] R rappresenta il raggio idraulico $[L]$ della sezione, V rappresenta la velocità $[L/T]$ e χ rappresenta il coefficiente di Chèzy $[L^{1/2}/T]$, che può essere espresso mediante diverse formulazioni.

Una delle formulazioni maggiormente utilizzata è quella di Gauckler-Strickler [5.2]:

$$\chi = \frac{1}{n} R^{1/6} = k_s R^{1/6} \quad [L^{1/2} T^{-1}] \quad [3.2]$$

Nella espressione [3.2] n rappresenta il coefficiente di Manning $[TL^{-1/3}]$ (reciproco del coefficiente k_s di Strickler).

3.2.2 Scabrezza utilizzata nel presente studio

Il valore del coefficiente di Manning [$\text{sm}^{-1/3}$] (reciproco del coefficiente di Strickler) è il valore da assegnare ai nodi di calcolo della griglia. Questo valore non rappresenta solamente la scabrezza ma tiene conto di tutte quelle variabili che non vengono direttamente tenute in considerazione dal modello di calcolo.

Il lavoro di calibrazione del modello nei confronti della scabrezza si è rivelato particolarmente lungo ed è stato effettuato per tentativi confrontando i risultati ottenuti dalla simulazione di alcuni eventi storici con quelli osservati alla stazione idrometrografica di Boretto. Si è anche confrontato il legame quote idriche (WSE) – portate (Q) ottenuto a Boretto dalle simulazioni con la scala delle portate di Boretto riportate sugli Annali Idrologici dall'anno 2000 all'anno 2015 (Fig.3.44). Da queste analisi si è giunti alla conclusione che i migliori valori di scabrezza da associare alla descrizione del dominio di calcolo risultano essere $k_s=33.33 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ (cioè $n=0.03 \text{ sm}^{-1/3}$) per l'alveo inciso e $k_s=25 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ (cioè $n=0.04 \text{ sm}^{-1/3}$) per le aree golenali.

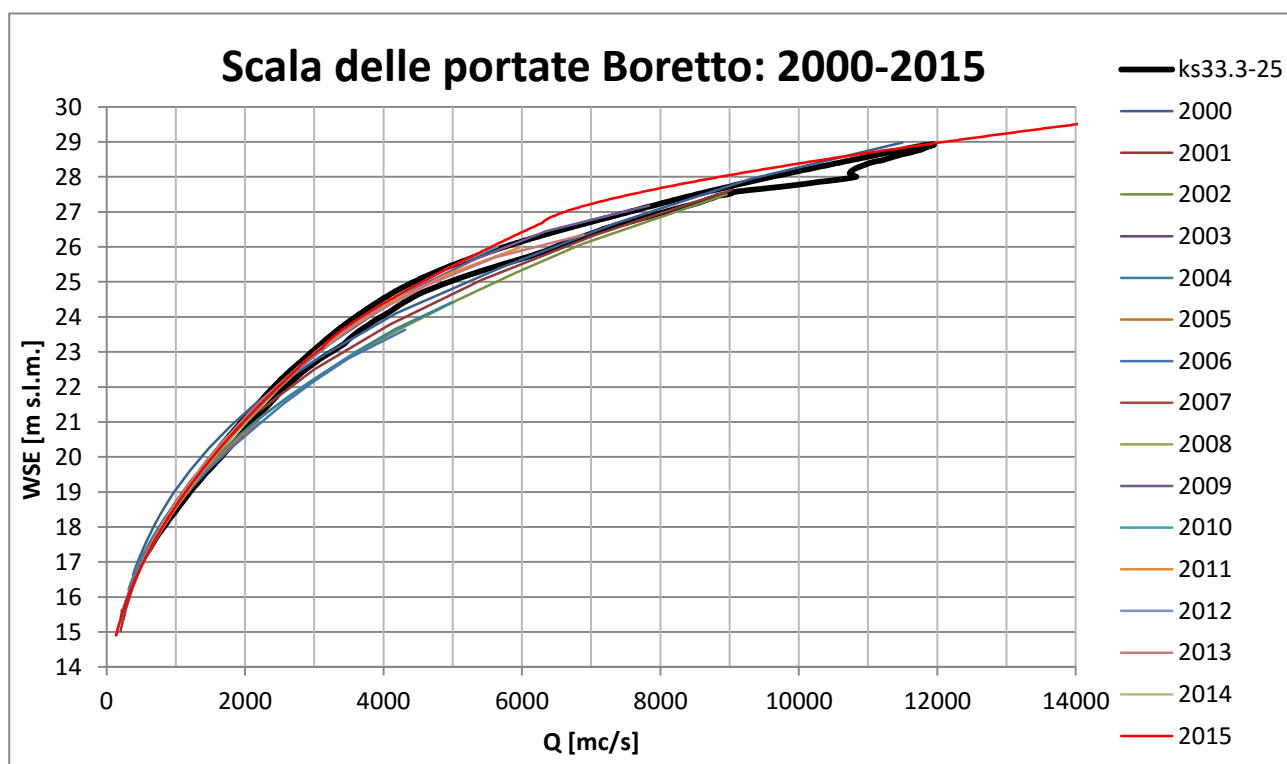


Fig.3.44 Scala delle portate di Boretto usata per la calibrazione della scabrezza.

Analogamente a quanto fatto per la batimetria anche il file .MAN è stato creato con l'ausilio del software *Surfer* (vedi Fig.3.45) e deve avere le stesse dimensioni del file .BTM:

X minimo: 610674 m;

X massimo: 630674 m;

Y minimo: 4972248 m;
Y massimo: 4982048 m.

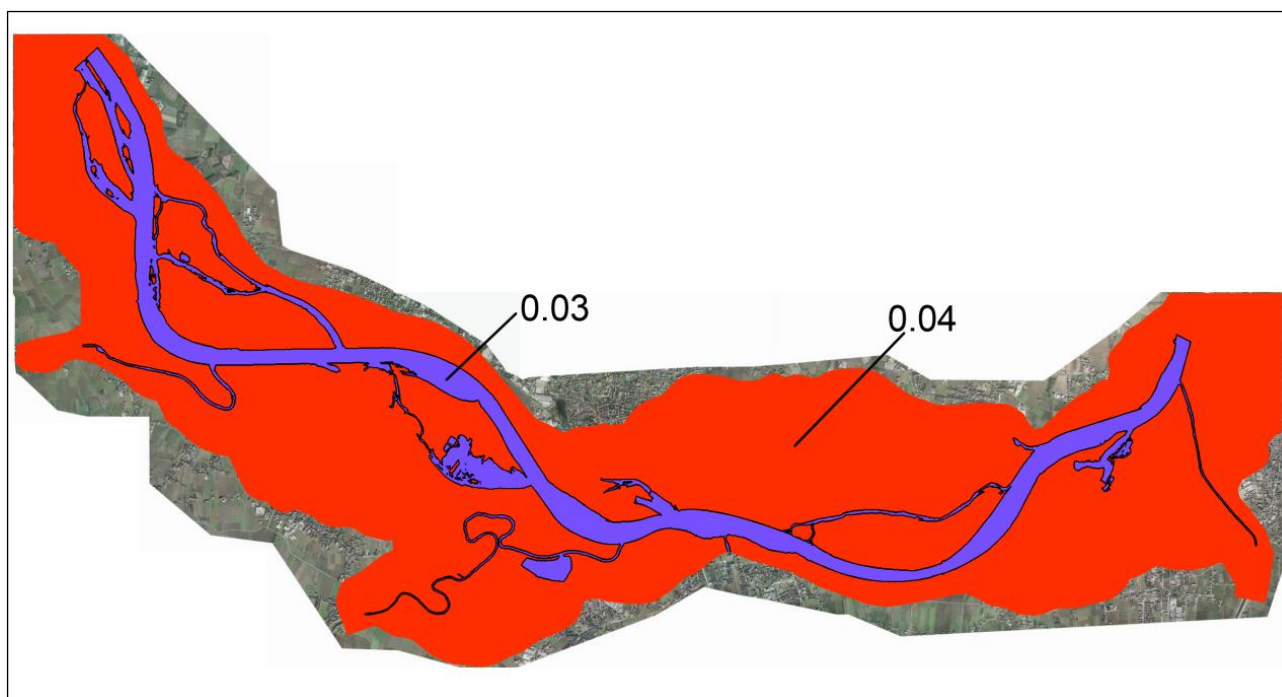


Fig.3.45 Rappresentazione dei coefficienti di scabrezza di Manning (unità di misura $sm^{-1/3}$) del dominio di calcolo.

3.3 Le condizioni iniziali di livello

Il modello numerico bidimensionale alle acque basse utilizzato necessita anche di una serie di condizioni al contorno e di condizioni iniziali. Una di queste ultime, la condizione iniziale di livello, è descritta dal file .INH. Questo tipo di file individua come terza coordinata spaziale del nodo di calcolo la quota idrica corrispondente all'istante iniziale della simulazione.

3.3.1 Il file .INH utilizzato nel presente studio

Nel modello e nelle simulazioni non viene utilizzato un file .INH univoco. Infatti numerose volte viene cambiato sulla base della condizione iniziale di portata descritta nel dettaglio in seguito (per fornire una condizione iniziale di livello congrua a quella descritta dal primo istante di tempo dell'onda di piena in ingresso).

Per la realizzazione del file .INH con l'ausilio del software *Surfer* esistono diverse modalità. Una di queste consiste nel modificare l'estensione del file di output .WSE (Water Surface Elevation, cioè quota idrica) di una precedente simulazione qualora

questo presentasse quote idriche che verosimilmente si riconducono a quelle volute come condizione iniziale.

In Fig.3.46 è possibile osservare il file .INH per portata costante pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$.

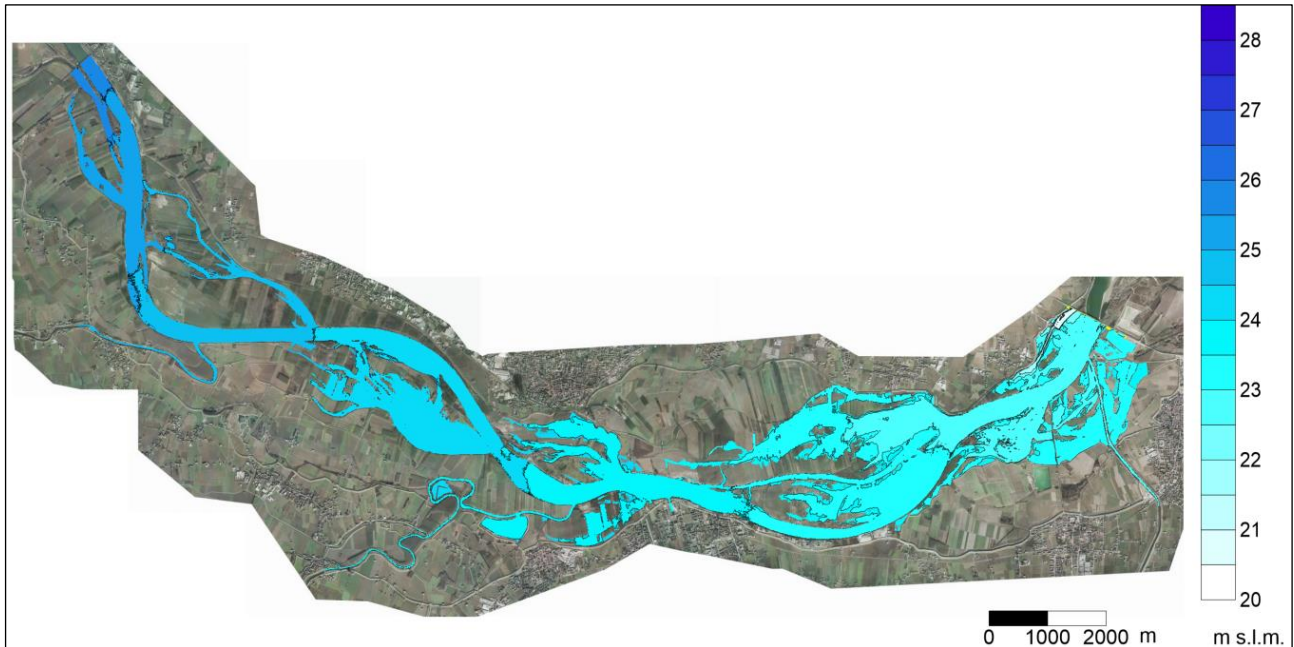


Fig.3.46 File .INH per portata costante pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.4 Le condizioni iniziali di portata specifica

I successivi file legati alle condizioni iniziali da inserire sono i file .VHX e .VHY che rappresentano rispettivamente la condizione iniziale di portata specifica in direzione X e Y.

3.4.1 I file .VHX e .VHY utilizzati nel presente studio

Analogamente al file .INH anche questi due tipi di file non sono stati definiti in modo univoco per tutte le simulazioni, ma dipendono appunto dalle condizioni iniziali definite dal primo istante di tempo dell'onda di piena in ingresso.

Occorre precisare che, a differenza di tutti i file di input precedentemente analizzati, i file .VHX e .VHY non sono strettamente necessari al fine di lanciare una simulazione. Infatti per la loro creazione è anche possibile sfruttare i dati di output di una precedente simulazione. I due file si ottengono attraverso l'utilizzo del comando *Grid Math* su *Surfer*: moltiplicando tra loro un file .DEP (contenente le profondità idriche in *m*) e un file .VVX (contenente le velocità in direzione X in *m/s*) relativi ad uno stesso istante di tempo si ottiene un file .VHX (che infatti è in m^2/s);

analogamente moltiplicando tra loro un file .DEP e un file .VVY relativi ad uno stesso istante di tempo si ottiene un file .VHY.

3.5 Le condizioni al contorno

Oltre ai file che descrivono le condizioni iniziali, occorre definire quelli che individuano le condizioni al contorno. In particolare il file necessario per delimitare il dominio di controllo e per stabilire il tipo di condizioni al contorno è un file di testo .BLN.

3.5.1 Struttura del file .BLN

Il file .BLN viene anch'esso realizzato con l'ausilio del software *Surfer* attraverso il comando *Digitize* e successivamente modificato con *Notepad++* o con un qualunque editor di testo. È necessario realizzare una poligonale in senso antiorario su *Surfer*.

Il file è strutturato nel seguente modo:

- Nella prima riga vi è il numero di punti che descrivono il poligono;
- Nelle successive righe vi sono 3 colonne che rispettivamente contengono la coordinata X del punto, la coordinata Y del punto ed un numero che individua la tipologia di condizione al contorno, che è riferita al segmento che unisce quel punto al successivo. Quindi la condizione al contorno assegnata all'ultimo punto è relativa al segmento che congiunge l'ultimo punto al primo punto, chiudendo così il poligono.

Le condizioni al contorno che è possibile assegnare sono di 6 differenti tipologie e sono individuate attraverso altrettanti numeri:

- 21: corrisponde ad una condizione di portata in ingresso. In questo caso deve essere definita l'onda in ingresso sul segmento in esame;
- 1: condizione di parete solida. In questo caso si ipotizza la presenza di un muro invalicabile dalla corrente: questa condizione si utilizza solitamente ai limiti esterni del dominio, per definirne il confine;
- 2: condizione di portata specifica;
- 3: condizione di livello. In questo caso viene imposto un livello idrico;
- 4: condizione di far-field. In questo caso si ipotizza che l'acqua si possa allontanare senza disturbo, come se il terreno fosse pianeggiante e privo di ostacoli;
- 5: condizione di scala di deflusso. In questo caso deve essere fornita la relazione che definisce l'andamento delle portate in funzione della quota idrica.

3.5.2 Le condizioni al contorno utilizzate nel presente studio

Nel caso in esame è stato utilizzato un file .BLN costituito da 55 punti e da altrettante condizioni al contorno (vedi Fig.3.47 nella quale è evidenziata la polilinea tracciata su *Surfer* e il tipo di condizione associata ad ogni punto individuato).

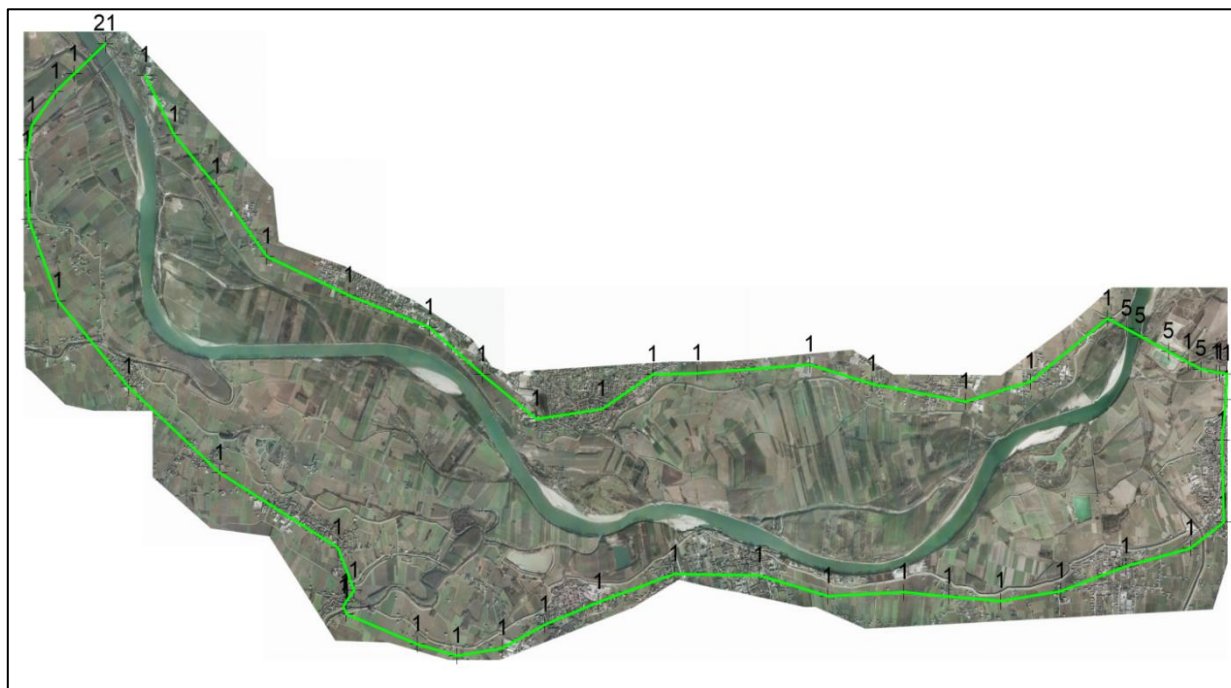


Fig.3.47 Rappresentazione del poligono delle condizioni al contorno (in verde).

Le condizioni al contorno sono quasi tutte di tipo 1 (muro invalicabile oltre gli argini maestri, cioè nelle zone prive di interesse per il presente studio) ad eccezione di cinque segmenti in totale (per alcune simulazioni sei segmenti):

- *Segmento 1*: condizione 21 (di portata in ingresso); questa condizione è applicata alla sezione di monte in corrispondenza del ponte ferroviario di Casalmaggiore (Fig.3.48);
- *Segmento 13*: condizione 21 (di portata in ingresso); questa condizione è applicata alla sezione di Coenzo sul torrente Enza e viene utilizzata solamente per alcune simulazioni (Fig.3.49);
- *Segmento 35*: condizione 5 (di scala delle portate); questa condizione è applicata nella sezione di valle sulla golenale destra del Po in corrispondenza della quale vi è un ponte stradale di luce circa pari a 220 metri (Fig.3.50);
- *Segmento 37*: condizione 5 (di scala delle portate); questa condizione è applicata in corrispondenza del ponte stradale di Guastalla all'area golenale destra contigua all'alveo inciso del Po (Fig.3.50);

- *Segmento 38*: condizione 5 (di scala delle portate); questa condizione è applicata all'alveo inciso del Po in corrispondenza del ponte stradale di Guastalla (*Fig.3.50*);
- *Segmento 39*: condizione 5 (di scala delle portate); questa condizione è applicata all'area golenale a sinistra dell'alveo inciso del Po in corrispondenza del ponte stradale di Guastalla (*Fig.3.50*).

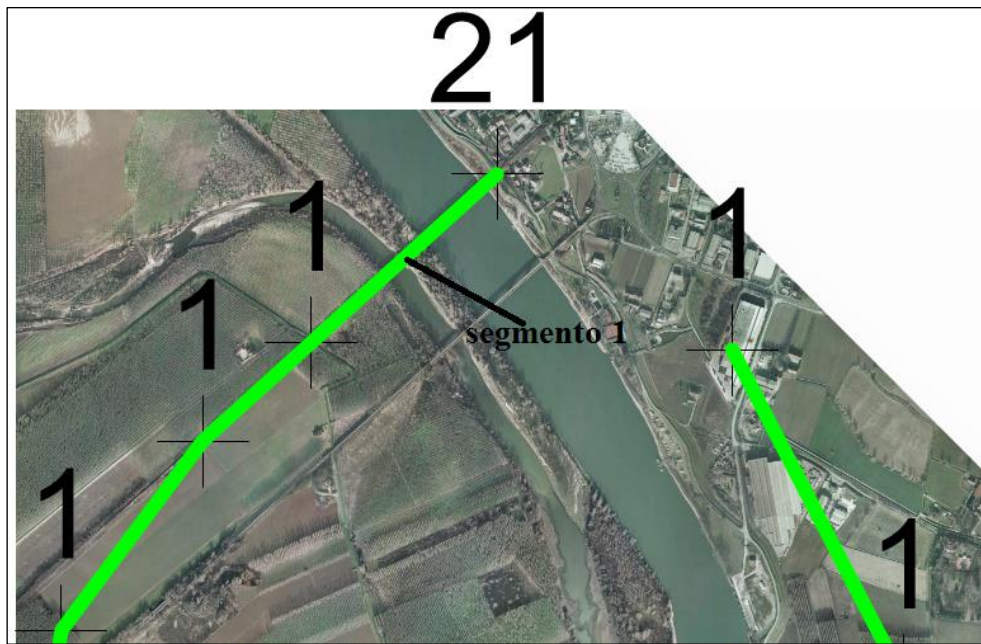


Fig.3.48 Individuazione della sezione di monte in cui è applicata la condizione al contorno 21.

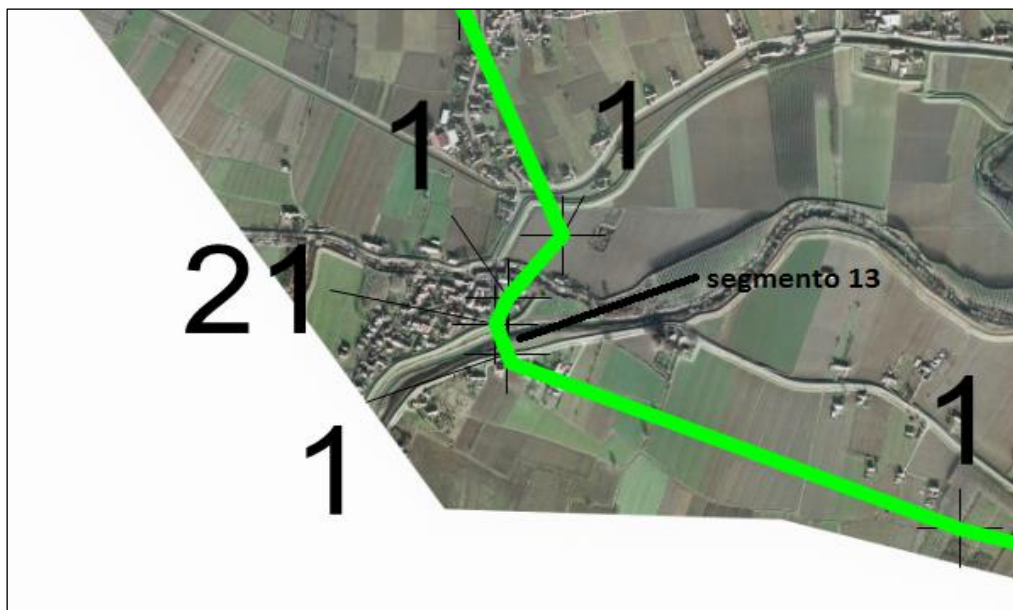


Fig.3.49 Individuazione della sezione di Coenzo in cui è applicata la condizione al contorno 21.

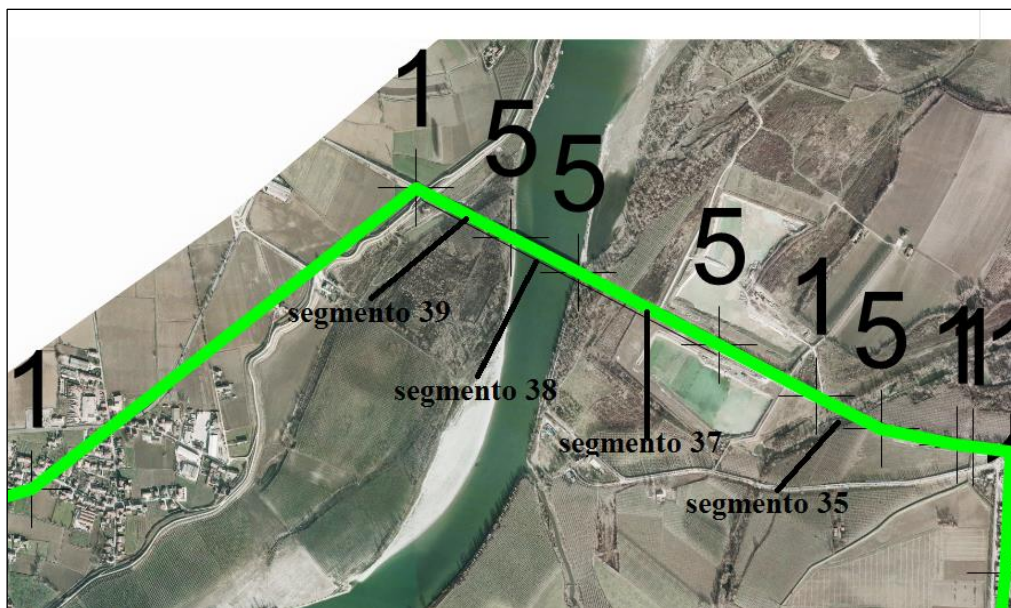


Fig.3.50 Individuazione delle sezioni di valle in cui è applicata la condizione al contorno 5.

La suddivisione della sezione in corrispondenza del ponte di Guastalla in 3 diverse sottosezioni si è resa necessaria per distinguere la zona dell'alveo inciso dalle aree golenali e per permettere una migliore lettura delle scale stesse da parte del programma di calcolo.

Come è anche possibile osservare in *Fig.3.51*, che riporta la struttura del file .BLN utilizzato, la condizione 21 è appunto da applicare al primo segmento che collega il punto nella riga 2 al punto nella riga 3. A seconda della simulazione è applicata anche un'eventuale condizione 21 al segmento 13 (confluenza Enza).

La prima condizione di tipo 5 si incontra al 35esimo segmento che collega il punto nella riga 36 al punto nella riga 37. Lo stesso ragionamento è da effettuare per le successive condizioni di tipo 5.

[illegible]

Fig.3.51 Struttura del file .BLN utilizzato.

3.6 Descrizione delle condizioni al contorno

Nel caso in cui nel file .BLN siano state definite delle condizioni al contorno diverse dal tipo 1 e dal tipo 4 (che non hanno bisogno di ulteriori specifiche), è necessario un ulteriore file di testo .BCC che contiene al suo interno le informazioni necessarie per caratterizzare gli altri tipi di condizione al contorno.

3.6.1 Struttura del file .BCC

Il file .BCC viene realizzato attraverso *Notepad++* e, a seconda della condizione al contorno, ha una differente espressione. Il file è preceduto in testa dal numero totale di condizioni al contorno diverse dalle condizioni di tipo 1 e 4.

Se la condizione è di tipo 21 (di portata assegnata) bisogna inserire il numero del segmento a cui è applicata la condizione affiancata dal numero di righe che descrive la condizione stessa. Nelle successive righe vi sono quattro colonne in cui si deve inserire rispettivamente il tempo (in s , colonna di valori letti), la quota idrica (in m

s.l.m., colonna di valori non letti), la portata (in m^3/s , colonna di valori letti) e una colonna di zeri.

Se la condizione è di tipo 3 (di livello assegnato) bisogna inserire il numero del segmento a cui è applicata la condizione affiancata dal numero di righe che descrive la condizione stessa. Nelle successive righe vi sono quattro colonne in cui si deve inserire rispettivamente il tempo (in *s*, colonna letta), la quota idrica (in *m s.l.m.*, colonna letta), la portata (in m^3/s , colonna non letta) e una colonna di zeri.

Se la condizione è di tipo 5 (di scala di deflusso) bisogna inserire il numero del segmento a cui è applicata la condizione affiancata dal numero di righe che descrive la condizione stessa. Nelle successive righe vi sono tre colonne in cui si deve inserire rispettivamente la quota idrica (in *m s.l.m.*, colonna letta), la portata (in m^3/s , colonna letta) e una colonna di zeri.

3.6.2 Il file .BCC utilizzato nel presente studio

Nel caso in esame nel presente studio il file .BCC è quindi costituito da un numero di condizioni complessive pari a 5 (per alcuni simulazioni 6). Le portate in ingresso (condizione 21) sono diverse a seconda del tipo di onda di piena esaminata e simulata e quindi variano da simulazione a simulazione.

Per quanto riguarda, invece, le rimanenti condizioni di scala di deflusso (condizione 5), queste rimangono invariate una volta completata la calibrazione relativamente al parametro della scabrezza.

A titolo di esempio si riporta (in *Fig.3.52*) la struttura del file .BCC utilizzato nella sua porzione relativa al *segmento 35* (scala delle portate utilizzata in corrispondenza del ponte che si trova in corrispondenza della sezione di valle e in destra idraulica del Fiume Po).

| | | | | | | | |
|-----|-------|--------|---|-----|-------|---------|---|
| 581 | 35 | 51 | | 607 | 26.59 | 570.87 | 0 |
| 582 | 0.00 | 0 | 0 | 608 | 26.70 | 595.88 | 0 |
| 583 | 21.20 | 0 | 0 | 609 | 26.81 | 620.85 | 0 |
| 584 | 21.87 | 5 | 0 | 610 | 26.92 | 645.87 | 0 |
| 585 | 22.36 | 15.16 | 0 | 611 | 27.02 | 670.84 | 0 |
| 586 | 22.90 | 33.21 | 0 | 612 | 27.13 | 695.84 | 0 |
| 587 | 23.32 | 57.75 | 0 | 613 | 27.23 | 720.79 | 0 |
| 588 | 23.64 | 87.15 | 0 | 614 | 27.33 | 745.77 | 0 |
| 589 | 23.91 | 114.93 | 0 | 615 | 27.43 | 770.76 | 0 |
| 590 | 24.13 | 141.84 | 0 | 616 | 27.53 | 795.7 | 0 |
| 591 | 24.34 | 167.81 | 0 | 617 | 27.63 | 820.67 | 0 |
| 592 | 24.52 | 193.63 | 0 | 618 | 27.73 | 845.65 | 0 |
| 593 | 24.70 | 219.03 | 0 | 619 | 27.82 | 870.58 | 0 |
| 594 | 24.87 | 244.37 | 0 | 620 | 27.92 | 895.54 | 0 |
| 595 | 25.03 | 269.68 | 0 | 621 | 28.01 | 920.51 | 0 |
| 596 | 25.18 | 294.99 | 0 | 622 | 28.10 | 945.44 | 0 |
| 597 | 25.32 | 320.2 | 0 | 623 | 28.19 | 970.4 | 0 |
| 598 | 25.47 | 345.36 | 0 | 624 | 28.28 | 995.33 | 0 |
| 599 | 25.60 | 370.48 | 0 | 625 | 28.37 | 1020.29 | 0 |
| 600 | 25.74 | 395.58 | 0 | 626 | 28.46 | 1045.24 | 0 |
| 601 | 25.87 | 420.65 | 0 | 627 | 28.55 | 1070.16 | 0 |
| 602 | 25.99 | 445.71 | 0 | 628 | 28.64 | 1095.12 | 0 |
| 603 | 26.12 | 470.76 | 0 | 629 | 28.72 | 1120.04 | 0 |
| 604 | 26.24 | 495.78 | 0 | 630 | 28.81 | 1144.99 | 0 |
| 605 | 26.36 | 520.85 | 0 | 631 | 28.89 | 1169.92 | 0 |
| 606 | 26.47 | 545.87 | 0 | 632 | 28.98 | 1194.86 | 0 |

Fig.3.52 Struttura del file .BCC per una delle condizioni di scala di deflusso.

Come è possibile osservare in Fig.3.52 la prima condizione 5 (letta nel file .BLN) è appunto applicata al 35esimo segmento e descritta in totale da 51 righe. Per ciascuna riga la prima colonna individua la quota idrica [*m s.l.m.*], la seconda colonna individua la portata [*m³/s*] da associare a quel livello e la terza colonna, non rilevante in questa tipologia di cc, è riempita da zeri.

3.6.3 Individuazione delle scale di deflusso per la sezione di valle

Per la determinazione delle scale delle portate per le sezioni di valle si è utilizzato il software *HEC-RAS*, simulando il transito di un'onda di piena in un alveo prismatico di sezione uguale a quella di valle. Questo software necessita che in input vengano inserite le seguenti informazioni per determinare poi la scala delle portate per quella sezione:

- la geometria della sezione in esame (importata da un foglio *Excel* dopo avere ottenuto progressiva e quota grazie al comando *Slice* su *Surfer*) che viene poi replicata identica;
- la scabrezza della sezione (è possibile suddividere la sezione in diverse porzioni per distinguere l'alveo inciso dalle zone golenali);

- la pendenza del fondo (nel caso in esame valutata pari a 0.10% da considerazioni precedenti, vedi *Par. 1.4*);
- un'onda in ingresso (è stata inserita un'onda sintetica con andamento secondo una funzione Gamma che arriva ad elevati valori di portata per potere avere una scala sufficientemente estesa).

Le prime due informazioni precedentemente definite sono attribuite alla sezione tipo nella finestra apposita di dialogo *Edit Geometric Data*.

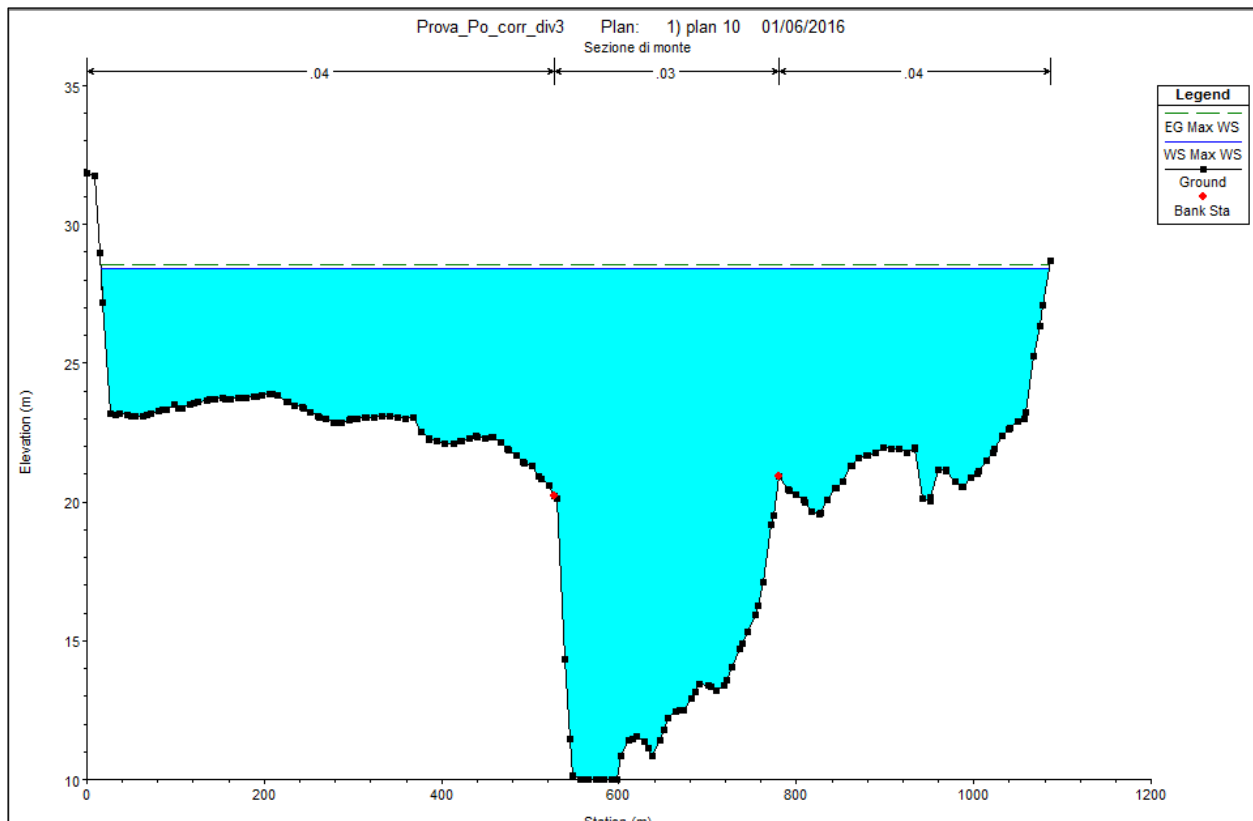


Fig.3.53 Rappresentazione della sezione trasversale di valle con HEC-RAS.

| Del Row | Ins Row | Downstream Reach Lengths | | |
|---------------------------|-----------|--------------------------|------------------------------------|------------|
| Cross Section Coordinates | | LOB | Channel | ROB |
| | Station | Elevation | | |
| 1 | 0 | 31.83941 | 10 | 10 |
| 2 | 0.1800532 | 31.848 | Manning's n Values | |
| 3 | 9.154669 | 31.7404 | LOB | Channel |
| 4 | 15.08567 | 28.95402 | 0.04 | 0.03 |
| 5 | 18.12929 | 27.19825 | Main Channel Bank Stations | |
| 6 | 27.1039 | 23.19745 | Left Bank | Right Bank |
| 7 | 32.73748 | 23.15883 | 526.988 | 780.9716 |
| 8 | 36.07852 | 23.18325 | Cont\Exp Coefficient (Steady Flow) | |
| 9 | 45.05313 | 23.14163 | Contraction | Expansion |
| 10 | 50.38929 | 23.07703 | 0.1 | 0.3 |
| 11 | 54.02775 | 23.06596 | | |
| 12 | 63.00237 | 23.08582 | | |
| 13 | 68.04109 | 23.14386 | | |
| 14 | 71.97698 | 23.18027 | | |
| 15 | 80.9516 | 23.26062 | | |
| 16 | 85.69289 | 23.30189 | | |
| 17 | 89.92622 | 23.34113 | | |
| 18 | 98.90083 | 23.51755 | | |
| 19 | 103.3447 | 23.36145 | | |
| 20 | 107.8754 | 23.35374 | | |
| 21 | 116.8501 | 23.53376 | | |
| 22 | 120.9965 | 23.57298 | | |
| 23 | 125.8247 | 23.58856 | | |
| 24 | 134.7993 | 23.67188 | | |
| 25 | 138.6483 | 23.68851 | | |
| 26 | 143.7739 | 23.70196 | | |
| 27 | 152.7485 | 23.73348 | | |
| 28 | 156.3001 | 23.71315 | | |
| 29 | 161.7231 | 23.69132 | | |
| 30 | 170.6978 | 23.72598 | | |
| 31 | 173.9519 | 23.7366 | | |

Fig.3.54 Finestra di dialogo relativa alle informazioni sulla sezione di valle.

Da quanto riportato in Fig.3.53 e in Fig.3.54 si può osservare come l'intera sezione di valle a Guastalla (individuata da: *segmento 37 + segmento 38 + segmento 39* in senso antiorario) sia stata divisa in 3 porzioni, delimitate da *Left Bank* e *Right Bank* (cioè rispettivamente *sponda sinistra* e *sponda destra*) e caratterizzate dunque da valori differenti di scabrezza (*Manning's n Values* in $sm^{-1/3}$). Si possono individuare la progressiva $[m]$ e la quota rispettiva $[m \text{ s.l.m.}]$ per un numero massimo di 500 punti.

Le rimanenti informazioni sono attribuite nella finestra di dialogo *Unsteady Flow Data*, nella quale di inseriscono le informazioni relative all'onda di piena in ingresso (*Flow Hydrograph*) e alla pendenza del fondo dell'alveo (*Normal Depth*) definite come condizioni al contorno (*Boundary Conditions*) (vedi Fig.3.55).

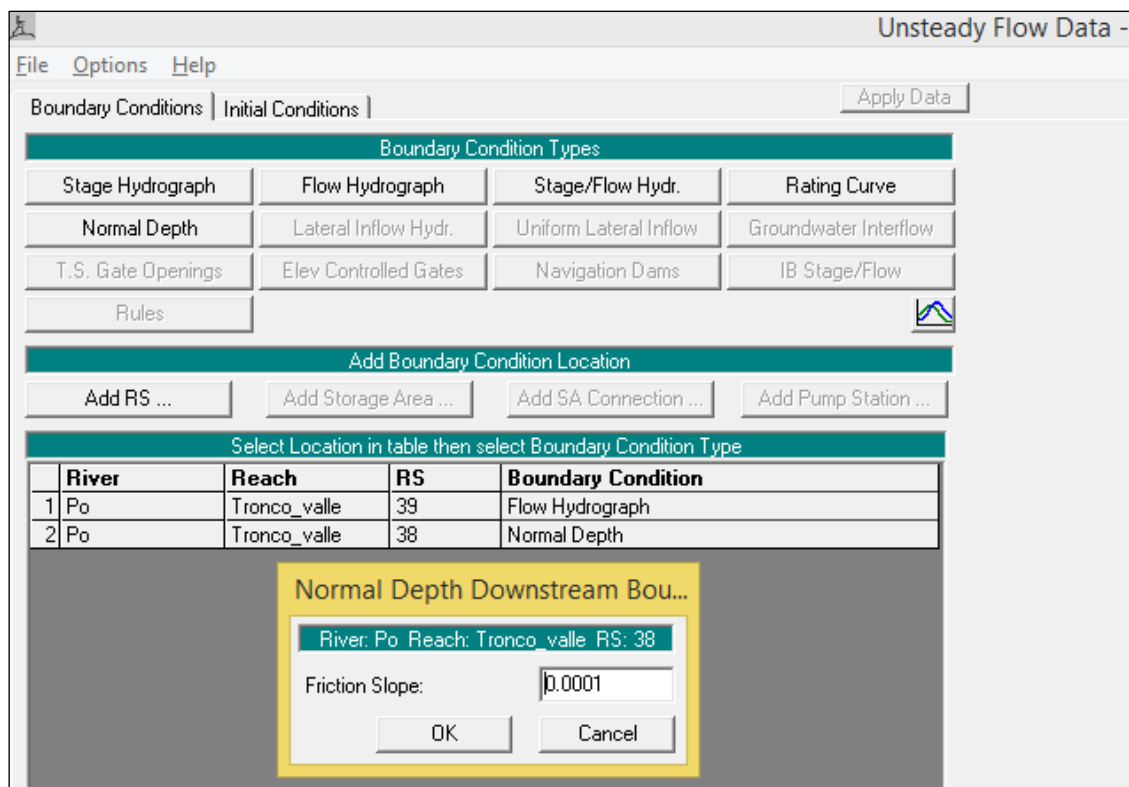


Fig.3.55 Finestra di dialogo Unsteady Flow Data.

Per avviare la simulazione è necessario definire, all'interno della finestra di dialogo *Unsteady Flow Analysis*, le ultime informazioni relative ai dati di cui tenere conto in input e alla durata della simulazione (vedi Fig.3.56).

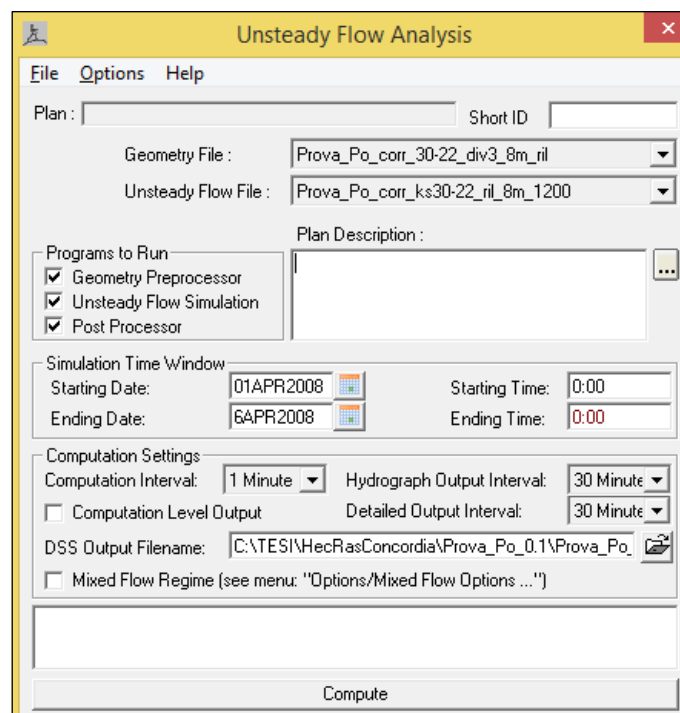


Fig.3.56 Finestra di dialogo Unsteady Flow Analysis.

Una volta terminata la simulazione il programma *HEC-RAS* restituisce in tabella una serie di parametri idraulici tra i quali quelli necessari per la creazione della scala delle portate per quella determinata sezione (vedi *Fig.3.57*, in cui è raffigurata la finestra di dialogo necessaria per aggiungere tutti i parametri idraulici calcolati di cui si ha bisogno di farsi restituire).

The screenshot shows the 'Create a Table Heading' dialog box. It has two tabs: 'Select Variables' and 'Additional Options'. The 'Select Variables' tab is active, displaying a list of available variables on the left and a table of column headings on the right. The table of column headings has 11 columns with headers: Column, Variable, Units, and Decimal Pts. The available variables list includes items like 'Q Culv', 'Q Culv Group', 'Q DS', 'Q Gate Group', 'Q Gates', 'Q Lat RC', 'Q Leaving Total', 'Q Left', 'Q Perc Chan', 'Q Perc L', 'Q Perc R', 'Q Pump Group', 'Q Pump Station', 'Q Right', 'Q Total', 'Q US', 'Q Weir', 'R. Freeboard', 'R. Levee Fbrd', 'Right Sta Eff', 'Right Station', 'ROB Elev', 'SA Area', 'SA Chan', 'SA Left', 'SA Min El', 'SA Right', 'SA Total', and 'SA Volume'.

| Column | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|-----------|-----------|--------------|----|
| Variable | Q Total | Min Ch El | W.S. Elev | Crit W.S. | E.G. Elev | E.G. Slope | Vel Chnl | Flow Area | Top Width | Froude # Chl | |
| Units | (m3/s) | (m) | (m) | (m) | (m) | (m/m) | (m/s) | (m2) | (m) | | |
| Decimal Pts | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 6 | 2 | 2 | 2 | 2 | |

Fig.3.57 Finestra di dialogo Create a Table Heading.

Una volta definiti i dati necessari per la creazione delle scale delle portate, questi dati vengono raccolti e ordinati per poter essere successivamente inseriti nel file .BCC per la descrizione della condizione al contorno di tipo 5 per ciascuna sezione caratterizzata da questa condizione.

In particolare le quattro scale in esame ottenute (*WSE-Q*) sono rappresentate in *Fig.3.58*, *Fig.3.59*, *Fig.3.60* e *Fig.3.61*.

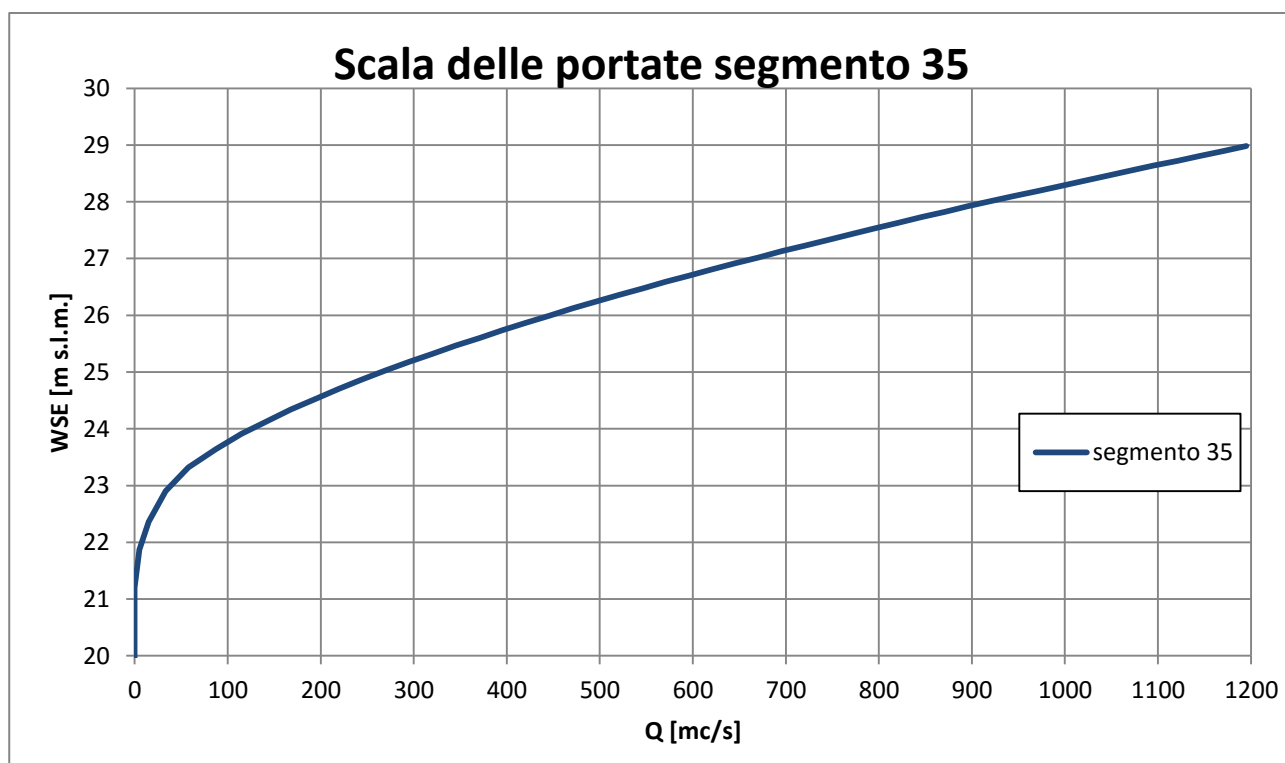


Fig.3.58 Scala delle portate di valle del segmento 35.

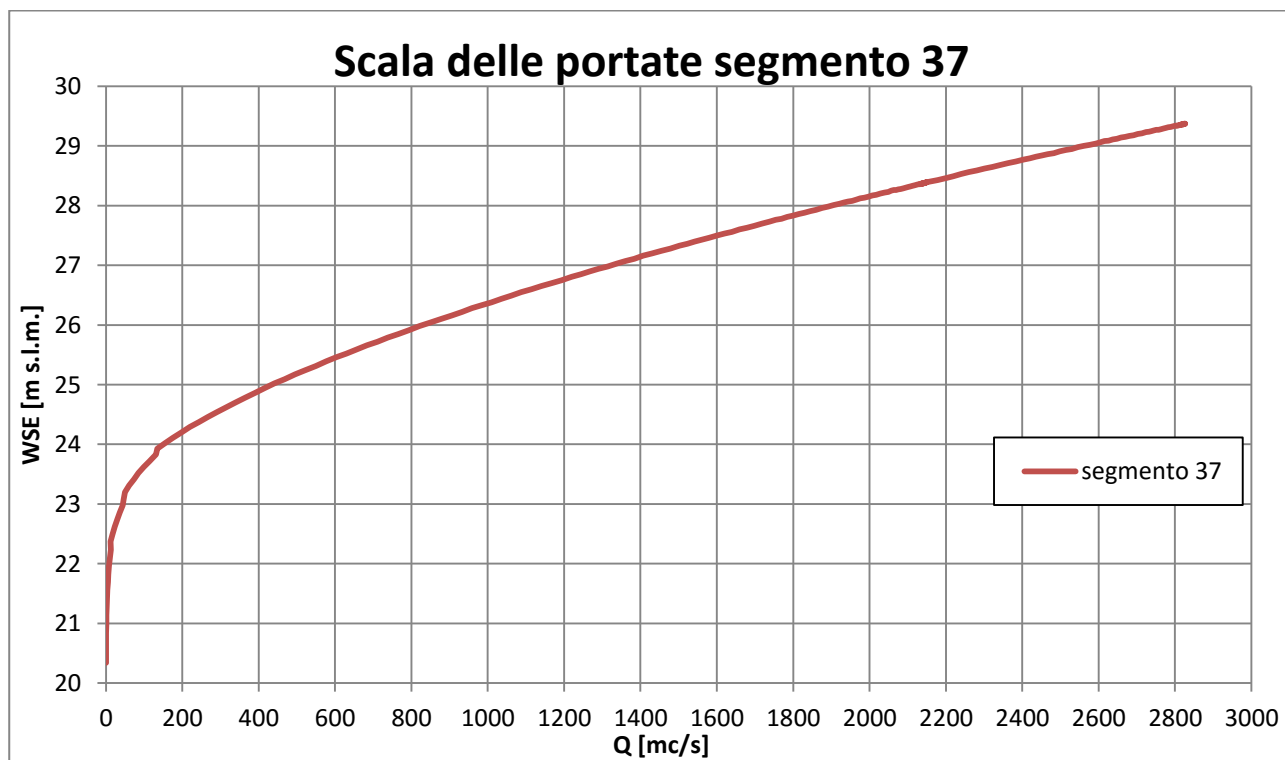


Fig.3.59 Scala delle portate di valle del segmento 37.

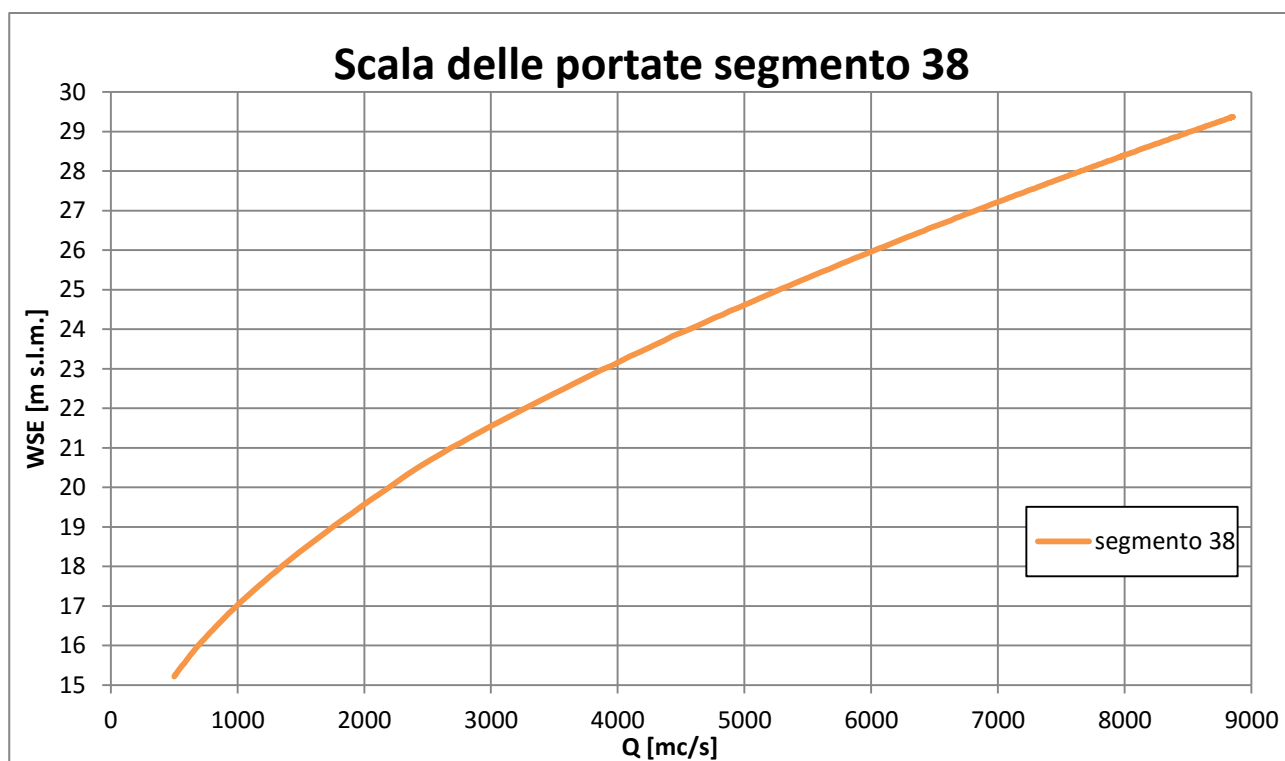


Fig.3.60 Scala delle portate di valle del segmento 38.

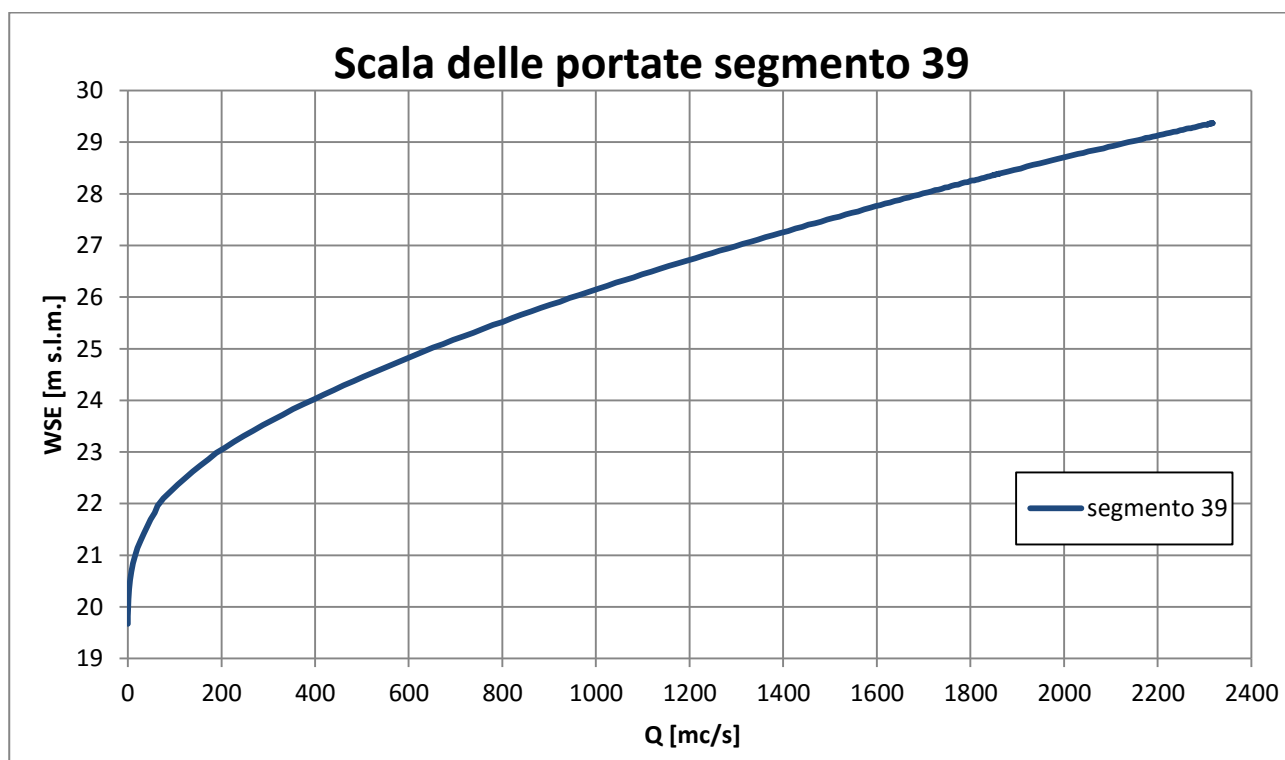


Fig.3.61 Scala delle portate di valle del segmento 39.

È necessario precisare che la sezione di valle principale (in corrispondenza del ponte di Guastalla) è stata divisa in tre parti per ovviare ad un problema connesso ad una particolare caratteristica del modello di calcolo. Nella lettura della scala delle portate di valle il modello determina la quota idrica come media aritmetica delle quote circostanti relative a quella sezione e, successivamente, restituisce il valore di portata letto nel file .BCC e corrispondente a quel livello medio. Questo procedimento non comporta problematiche nella fase di risalita dell'onda di piena; tuttavia, nella fase di esaurimento la quota idrica diminuisce all'interno dell'alveo inciso, ma in numerose zone golenali rimangono modeste quantità di acqua "sospese": di conseguenza nella fase di esaurimento il modello individua una WSE media maggiore rispetto a quella che si ha nell'alveo (perché tiene in considerazione anche delle "pozzanghere" d'acqua presenti anche alcuni metri più in alto in golenale), restituendo quindi un erroneo valore di portata transitante (in particolare più elevato, come si può osservare in Fig.3.62 in cui vi è la raffigurazione della scala delle portate errata quando si considera tutta la sezione). Suddividendo la sezione in tre porzioni ed isolando l'alveo principale dalle aree golenali si riesce dunque ad ovviare a questa problematica (vedi Fig.3.63 in cui la scala delle portate per il solo alveo inciso descritto dal *segmento 38* è letta correttamente anche nella fase di esaurimento).

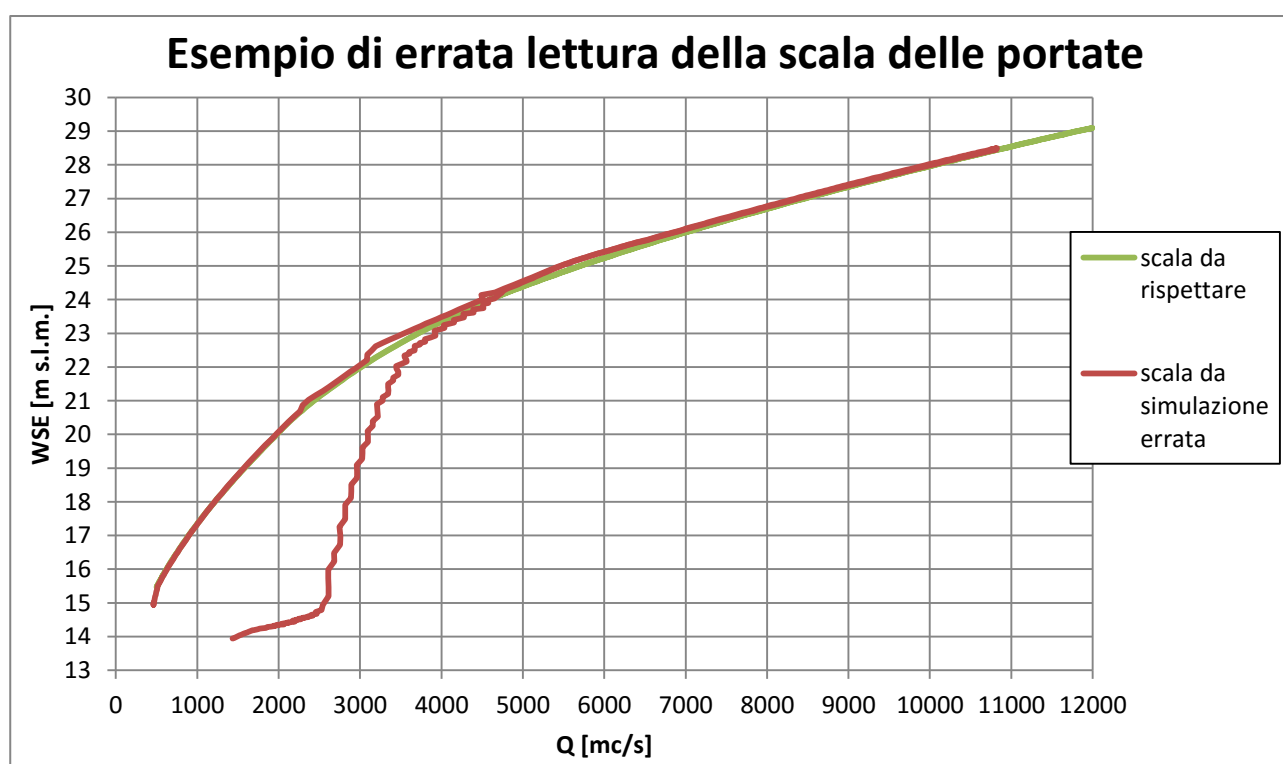


Fig.3.62 Errata lettura della scala delle portate.

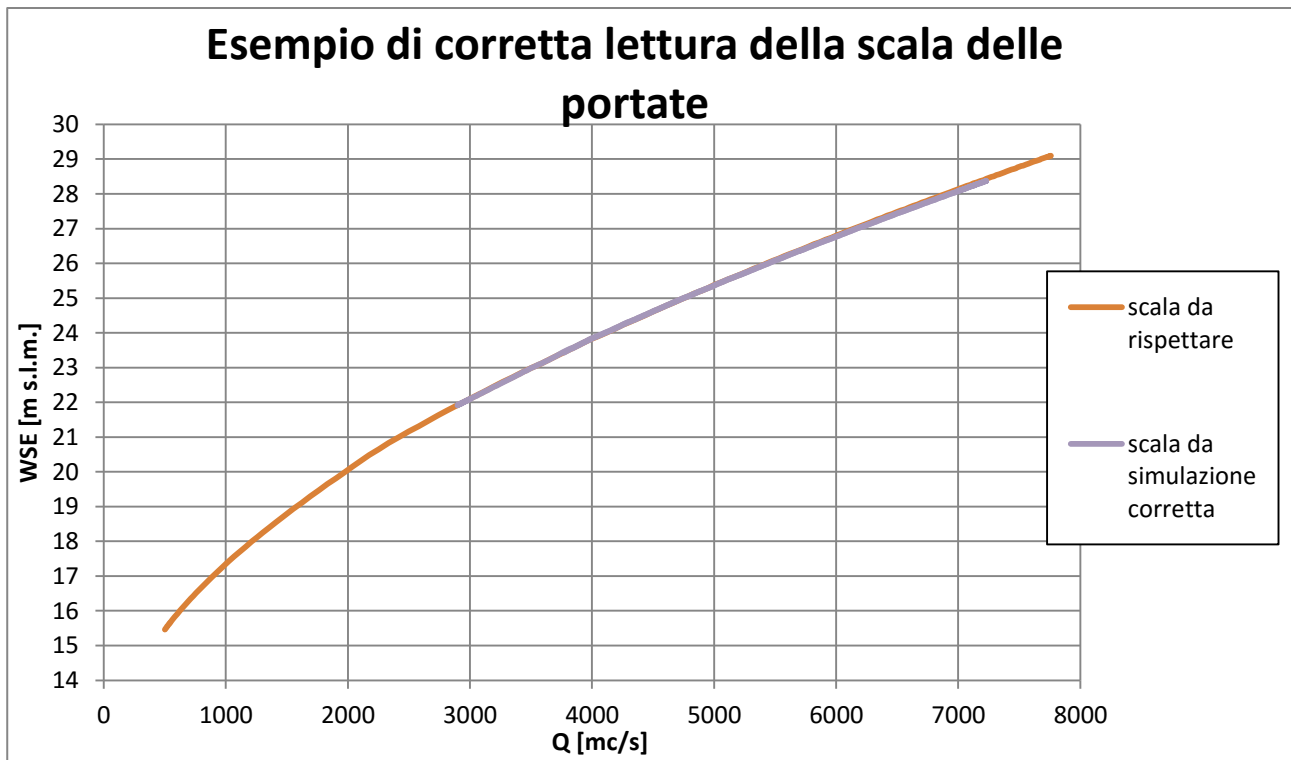


Fig.3.63 Corretta lettura della scala delle portate.

Si specifica quindi che per ogni simulazione è stata verificata la corretta lettura delle scale delle portate.

3.7 I file input.txt e run_simulazione

Il file di input.txt è un file di testo che contiene le rimanenti informazioni indispensabili al modello di calcolo per eseguire le elaborazioni. In Fig.3.64 si riporta l'esempio di un file di input.

```

1 prova47    ! file name BASE with input files for initial conditions, bathymetry, output and boundary conditions
2 START 0.    ! t0, beginning time (hours)
3 END 338     ! tlast, simulation time
4 DTOUTPUT 0.5 !in hours
5 CR 0.8      ! CR, courant number
6 LIMITER 3   ! limiter, (1 van leer, 2 van albeda, 3 minbee, 4 superbee)
7 YEPS 1.E-3  ! yeps, water depth threshold for wet/dry cell
8 VELEPS 0.50 !threshold to limit fluxes for very shallow cells
9 MUSCL -1    ! R, MUSCL reconstruction -1 UPWIND, 1 CENTERED
10 IBINARY 0  ! IBINARY, input/output (1 for ASCII, 0 for IBINARY)
11 AL 2       ! AL 0 SGM puro, 1 DGM puro, 2 WSDGM
12 SR 1       ! SR, 1 strang splitting formulation for friction source term, 0 for godunov formulation
13 DTSOGLIA 0.03 ! dtsoglia, threshold for the time step (if dt<dtsoglia then WARNING is plotted)
14 EXPON 1.667 ! expon, for discharge redistribution at inflow boundary conditions
15 AW 0.      ! A WSDGM, froude number for the beginning of the DGM transition
16 BW 2.0     ! B WSDGM, end of the DGM transition
17 METODO 1    ! metodo, 2 for HLLC fluxes, 1 for slic fluxes
18 NITER 3     ! niter, iteration number for correction procedure at wetting/drying fronts

```

Fig.3.64 Esempio di file input.txt.

I principali parametri contenuti nel file di input che possono richiedere modifiche sono i seguenti:

- NOME STRINGA: in questa riga è contenuto il nome di ciò che precede l'estensione di ciascun file analizzato in precedenza;
- START: questa riga contiene il tempo iniziale di simulazione in ore;
- END: questa riga contiene il tempo finale di simulazione in ore;
- DTOUTPUT: questa riga contiene l'intervallo di tempo al quale salvare i dati di output in ore; per tutte le simulazioni si è scelto un intervallo semi-orario;
- CR: questa riga contiene il numero di Courant, necessario per definire il passo di calcolo; per tutte le simulazioni è rimasto inalterato il valore pari a 0.8;
- YEPS: questa riga contiene la soglia (in m) che distingue le celle bagnate da quelle asciutte. Nell'esempio di *Fig.3.64* è stabilito ad un valore di 0.001 m, cioè 1 mm: questo significa che se in una cella vi è una profondità idrica minore di 1 mm quella cella viene automaticamente considerata asciutta. Un basso valore di soglia è indice di elevata precisione ma al contempo espone maggiormente al rischio di instabilità numerica il modello di calcolo; pertanto, a seguito di numerose considerazioni, un valore pari a 1 mm è stato considerato un buon compromesso per tutte le simulazioni;
- VELEPS: questa riga contiene la soglia (in m) per limitare i flussi scambiati tra le celle; per tutte le simulazioni è stato considerato un valore pari a 0.5 m;
- DTSOGLIA: questa riga contiene la soglia temporale (in s) per il passo di calcolo, calcolato dalla relazione [3.3].

$$\Delta t = C_r \cdot \min \left[\frac{\Delta x}{\|u\| + \sqrt{gh}}; \frac{\Delta y}{\|v\| + \sqrt{gh}} \right] \quad [T] \quad [3.3]$$

Il DTSOGLIA è una sorta di parametro di sicurezza. Infatti, nel caso in cui durante le simulazioni si ottenessero delle velocità non fisiche, il denominatore assumerebbe valori molto alti, facendo scendere il Δt al di sotto della soglia prefissata e interrompendo così la simulazione in esame.

I file necessari quindi per avviare una simulazione sono i seguenti:

- [nome_caso].BTM;
- [nome_caso].MAN;
- [nome_caso].BLN;
- [nome_caso].BCC;
- [nome_caso].INH;
- [nome_caso].VHX;

- [nome_caso].VHY;
- input_nome_caso.txt;
- run_simulazione.

Una volta inseriti in un'unica cartella questi file è necessario aggiungere un ultimo file denominato *run_simulazione* che serve concretamente per avviare la simulazione stessa. In questo file sono contenute le informazioni finali relative a come lanciare la simulazione, come è possibile osservare da quanto illustrato in *Fig.3.65*.

```
#!/bin/bash

nome_caso_test="prova47"

nohup ../../bin/swegpu input_${nome_caso_test}.txt -gpu=1 -order=1 -multi=hi > output_${nome_caso_test}.txt &
#nohup ../../bin/swegpu input_${nome_caso_test}.txt -gpu=0 -order=2 -multi=hi > output_${nome_caso_test}.txt &
#nohup ../../bin/swegpu input_${nome_caso_test}.txt -gpu=1 -order=2 -multi=1 -bcc-level=1 -resume=0250 > output_${nome_caso_test}.txt &
```

Fig.3.65 Struttura del file run_simulazione.

In particolare nella *Fig.3.65* è possibile distinguere i seguenti parametri:

- gpu=xxxx: indica il numero della scheda GPU da impegnare per la simulazione;
- multi=xxxx: indica il grado di risoluzione da utilizzare. I gradi di risoluzione sono: hi, 1, 2, 3 e 4. La risoluzione diminuisce passando da hi a 4. Per tutte le simulazioni si è scelto di adottare *multi=hi*;
- order=xxxx: indica l'ordine di precisione da mantenere; per tutte le simulazioni si è scelto di adottare *order=1*; in questo modo in un'ora si riescono a simulare circa 24-30 ore di evento di piena;
- resume=xxxx: indica l'istante temporale (il frame) dal quale fare ripartire una simulazione; questo comando si sfrutta nei casi in cui si vuole fare ripartire una simulazione interrotta per qualunque motivo da un determinato istante di tempo modificando da quello successivo alcune variabili o alcuni file.

4 Descrizione dei file di output

Il modello di calcolo restituisce una serie di file di output che descrivono il comportamento e l'interazione del dominio di calcolo nei confronti dell'evento di piena simulato.

Tra i file che il modello restituisce vi sono i seguenti:

- `output_[nome_caso].txt`: restituisce in modo dettagliato il procedimento seguito dal modello di calcolo. Per questo motivo diventa quindi un utile strumento per comprendere immediatamente se la simulazione si è conclusa in modo corretto oppure per individuare il motivo per il quale la simulazione si è eventualmente interrotta. Infatti in esso si segnala la lettura di tutti i file con gli eventuali errori annessi e, per ogni istante di calcolo, si segnalano le celle (i,j) che regolano il passo di calcolo Δt ; in *Fig.4.1* è possibile osservare, ad esempio, la parte di questo file in cui viene illustrato come i file `.INH`, `.VHX`, `.VHY`, `.BTM`, `.MAN` per quella simulazione siano stati letti con successo;
- `[nome_caso]-output-xxxx.WSE`: contiene le quote idriche (Water Surface Elevation, in *m s.l.m.*) di tutti i punti del dominio di calcolo per ogni istante temporale definito dal `DTOUTPUT` del file `input.txt`. È possibile decodificare anche il massimo valore di WSE registrato per quella determinata simulazione;
- `[nome_caso]-output-xxxx.DEP` (contiene le profondità `DEPth` in *m*) di tutti i punti del dominio di calcolo per ogni istante temporale definito dal `DTOUTPUT` del file `input.txt`. Può anche essere ottenuto come differenza tra il file `.WSE` e il file `.BTM` per quella data simulazione e per quel frame con il comando *Grid Math* di *Surfer.*;
- `[nome_caso]-output-xxxx.VVX`: contiene la componente lungo X dei vettori velocità di tutti i punti del dominio di calcolo per ogni istante temporale definito dal `DTOUTPUT` del file `input.txt`;
- `[nome_caso]-output-xxxx.VVY`: contiene la componente lungo Y dei vettori velocità di tutti i punti del dominio di calcolo per ogni istante temporale definito dal `DTOUTPUT` del file `input.txt`;
- `[nome_caso].PMAP`: contiene le informazioni relative al grado di risoluzione e alla discretizzazione della griglia di calcolo sulla base dei dati in `input` e sulla base di quanto definito nel file *run_simulazione*;

- [nome_caso]_output.txt: contiene tante righe quanti sono gli istanti di simulazione e riassume i tempi di calcolo e di salvataggio. Gli istanti di simulazione vanno da 0 (corrispondente alla prima mezz'ora di simulazione) a LAST (corrispondente all'ultima mezz'ora di simulazione).

```
read inh: Reading 32621088 characters... all characters read successfully.
Open ASCII prova47.INH: Read grid 1226 2501, x 610674.00..630674.00 y 4972248.00..4982048.00 val 20.52 - 27.14
delta 8.000000 8.000000
No sections!
sezioni
read vhx: Reading 25956928 characters... all characters read successfully.
Open ASCII prova47.VHX: Read grid 1226 2501, x 610674.00..630674.00 y 4972248.00..4982048.00 val -2.54 - 26.48
read vhy: Reading 26076267 characters... all characters read successfully.
Open ASCII prova47.VHY: Read grid 1226 2501, x 610674.00..630674.00 y 4972248.00..4982048.00 val -22.27 - 25.64
read btm: Reading 27984263 characters... all characters read successfully.
Open ASCII prova47.BTM: Read grid 1226 2501, x 610674.00..630674.00 y 4972248.00..4982048.00 val 5.84 - 39.42
read man: Reading 30831648 characters... all characters read successfully.
Open ASCII prova47.MAN: Read grid 1226 2501, x 610674.00..630674.00 y 4972248.00..4982048.00 val 0.03 - 0.05
```

Fig.4.1 Parte iniziale del file output.txt.

4.1 Restituzione delle mappe

Per potere visualizzare i file .WSE, .DEP, .VHX e .VHY con l'ausilio del software *Surfer* è necessario decodificare i file precedentemente descritti grazie all'utilizzo dell'apposito file *run_decode_mappe*, visualizzato in Fig.4.2.

In particolare di seguito si elencano i principali parametri che possono essere modificati nel file:

- frame_start=xxxx: indica il frame al quale iniziare ad effettuare il decode;
- frame_end=xxxx: indica il frame al quale terminare il decode; naturalmente se si ha la necessità di decodificare un solo frame è sufficiente uguagliare tra loro frame_start e frame_end. Analogamente è necessario che l'istante di tempo finale sia maggiore o uguale all'istante di tempo iniziale;
- estremi="...": indica gli estremi del dominio per cui effettuare i decode (si inseriscono gli stessi estremi X e Y del file .BTM).


```
#!/bin/bash

nome_test="prova47"

frame_start=199
frame_end=199

livello_ris=1
estremi="610674 630674 4972248 4982048"

percorso="."/"
nome_file=${percorso}/${nome_test}-output-0000"
nome_file_last=${percorso}/${nome_test}-output-LAST"
swegpu="../../bin/swegpu"

echo $percorso
echo $nomefile
echo $swegpu

#DECODE MAPPE
${swegpu} -decode ${nome_file}.DEP ${percorso}${nome_test}-outputasciilAST -frames $frame_start $frame_end -range $estremi -res=$livello_ris
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}${nome_test}-outputasciilAST -frames $frame_start $frame_end -range $estremi -res=$livello_ris
${swegpu} -decode ${nome_file}.VVX ${percorso}${nome_test}-outputasciilAST -frames $frame_start $frame_end -range $estremi -res=$livello_ris
${swegpu} -decode ${nome_file}.VWY ${percorso}${nome_test}-outputasciilAST -frames $frame_start $frame_end -range $estremi -res=$livello_ris

#DECODE LAST
${swegpu} -decode ${nome_file_last}.DEP ${percorso}${nome_test}-outputasciilAST-DEP -range $estremi -res=$livello_ris
${swegpu} -decode ${nome_file_last}.MAXNSE ${percorso}${nome_test}-outputasciilAST-MAXNSE -range $estremi -res=$livello_ris
${swegpu} -decode ${nome_file_last}.BTM ${percorso}${nome_test}-outputasciilAST-BTM -range $estremi -res=$livello_ris
${swegpu} -decode ${nome_file_last}.VVX ${percorso}${nome_test}-outputasciilAST-VVX -range $estremi -res=$livello_ris
${swegpu} -decode ${nome_file_last}.VWY ${percorso}${nome_test}-outputasciilAST-VWY -range $estremi -res=$livello_ris
```

Fig.4.2 Struttura del file run_decode_mappe.

Analogamente a quanto accade per altri tipi di file, i file .DEP e .WSE si caricano su *Surfer* come *Contour Layer*. Invece i file .VVX e .VWY devono essere caricati come *2-Grid Vector Layer*.

4.2 Restituzione della portata transitante

Per poter meglio comprendere l'andamento della portata nel tempo per diverse sezioni è necessario utilizzare il file di testo *run_decode_sezioni*, la cui struttura è raffigurata in *Fig.4.3*. In particolare risulta essere necessario inserire, per ogni sezione, le coordinate X e Y dei 2 punti che definiscono la sezione. Una sezione deve essere sufficientemente larga affinché si eviti che l'acqua stessa aggiri la sezione, nel qual caso verrebbe restituita una portata minore.

Analogamente al caso del *run_decode_mappe* si ha che:

- frame_start=xxxx: indica il frame al quale iniziare ad effettuare il decode;
- frame_end=xxxx: indica il frame al quale terminare il decode.

```
#!/bin/bash

percorso="."
nome_file=${percorso}/prova47-output-0000"
swegpu=".../bin/swegpu"

frame_start=0
frame_end=675

echo $percorso
echo $nomefile
echo $swegpu

${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sezmont -frames $frame_start $frame_end -sez 611502.69226635 4981381.0012133 612046.43418023 4981858.2093065 -res=1
# ${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez1 -frames $frame_start $frame_end -sez 610318.984 4980371.002 612091.997 4981960.014 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez2 -frames $frame_start $frame_end -sez 610589.986 4980211.001 612258.998 4981641.012 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez3 -frames $frame_start $frame_end -sez 611399.992 4978939.991 612996.004 4980257.002 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez4 -frames $frame_start $frame_end -sez 612486.001 4976859.976 614201.014 4978779.991 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez5 -frames $frame_start $frame_end -sez 614136.014 4975626.967 615477.024 4978006.985 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez6 -frames $frame_start $frame_end -sez 616414.031 4977694.983 615865.028 4974526.959 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez7 -frames $frame_start $frame_end -sez 617396.039 4973622.953 618030.043 4976895.978 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez8 -frames $frame_start $frame_end -sez 617230.038 4972435.944 619405.054 4975697.969 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez9 -frames $frame_start $frame_end -sez 621217.068 4973735.955 620502.062 4976041.972 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez10 -frames $frame_start $frame_end -sez 621513.070 4973824.955 620992.066 4976339.974 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez11 -frames $frame_start $frame_end -sez 621989.074 4974205.958 622242.075 4976519.976 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sez12 -frames $frame_start $frame_end -sez 622861.081 4973899.956 623567.085 4976689.978 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}sezBor -frames $frame_start $frame_end -sez 623221.72631777 4973604.1116894 624095 4976750 -res=1]
```

Fig.4.3 Struttura del file run_decode_sezioni.

Il *run_decode_sezioni* restituisce una serie di file .SEZ (uno per ogni sezione decodificata) caratterizzati da un numero di righe pari al numero di frame della simulazione e da due colonne, nelle quali vi sono la portate transitanti in direzione Y (SEZY) e in direzione X (SEZX) per quell'istante di tempo. Al fine di ottenere la portata totale transitante si deve effettuare $SEZX \pm SEZY$ a seconda dell'ordine in cui sono state inserite nel file le coordinate X_1 , Y_1 e X_2 , Y_2 dei punti rappresentanti la sezione.

In particolare:

- Se $Y_2 > Y_1$:
 - Se $X_1 < X_2$: $SEZX - SEZY$;
 - Altrimenti: $SEZX + SEZY$;
- Altrimenti ($Y_2 < Y_1$):
 - Se $X_1 < X_2$: $SEZX + SEZY$;
 - Altrimenti: $SEZX - SEZY$;

Individuare l'andamento della portate nel tempo per una serie di sezioni di controllo è un utile strumento per constatare eventuali errori nella definizione, ad esempio, dell'onda di piena in ingresso e in generale per comprendere meglio la corretta lettura di tutti i file di input.

A tale scopo si sono individuate un totale di 21 sezioni di controllo, così distribuite da monte a valle:

- sezmon: questa sezione è collocata immediatamente a valle della sezione di Casalmaggiore e serve per controllare e verificare che la portata in ingresso sia effettivamente quella descritta dal file .BCC;
- sez35A, sez35B, sez35D, sez35E, sez35F, sez36, sez36A, sez37, sez37BIS, sez37A, sez37B tra la sezione di monte e Boretto, secondo la nomenclatura del Rilievo del Fiume Po realizzato nel 2005 dall'Agenzia Interregionale per il fiume Po;
- sezBor: questa sezione è collocata in corrispondenza dell'idrometro di Boretto e serve per il confronto con i dati storicamente osservati;
- sez37C, sez38, sez38A, sez38B, sez38C, sez38D tra Boretto e Guastalla sempre secondo la nomenclatura del Rilievo del Fiume Po realizzato nel 2005 dall'Agenzia Interregionale per il fiume Po;
- sezvalle1: questa sezione è collocata in corrispondenza del ponte di Guastalla per verificare l'effettiva lettura delle scale delle portate dei *segmenti* 37, 38 e 39 del file .BLN (a sua volta la sezione è divisa infatti in tre sezioni);
- sezvalle2: questa sezione è collocata in corrispondenza del più piccolo ponte di Guastalla per verificare l'effettiva lettura delle scale delle portate del *segmento* 35 del file .BLN.

In Fig.4.4 è possibile comprendere meglio la posizione di ciascuna sezione nel dominio di calcolo. In Fig.4.5 è riportato un esempio di andamento delle portate ottenute per un evento sintetico di prova.

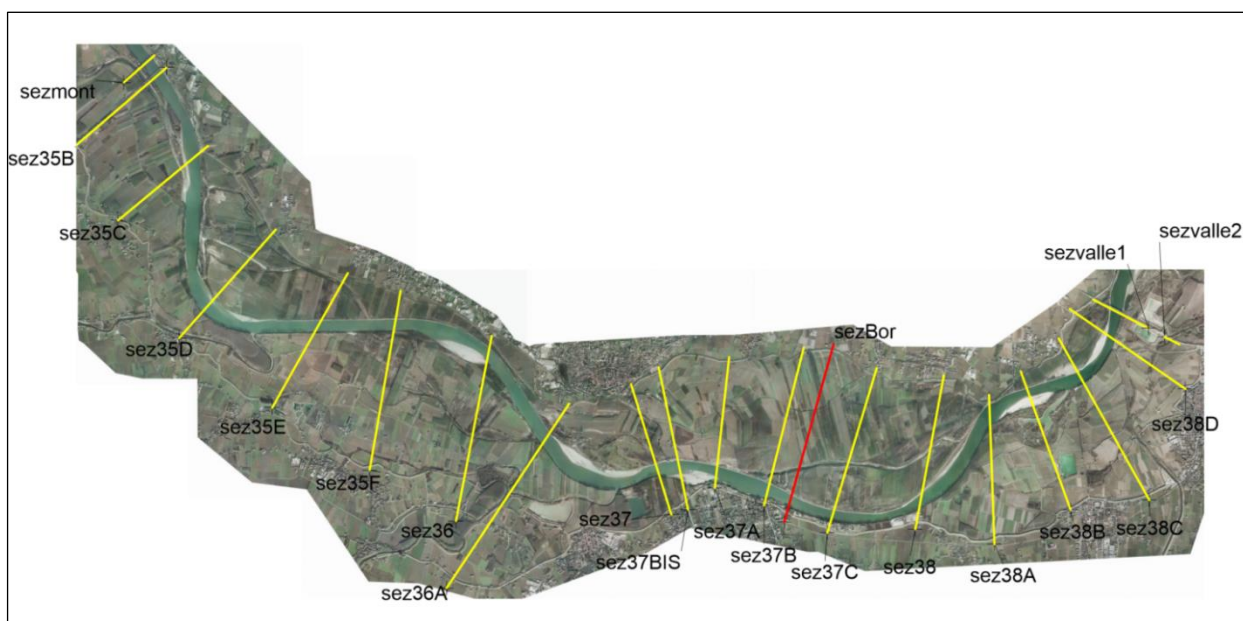


Fig.4.4 Identificazione delle sezioni di controllo nel dominio di calcolo.

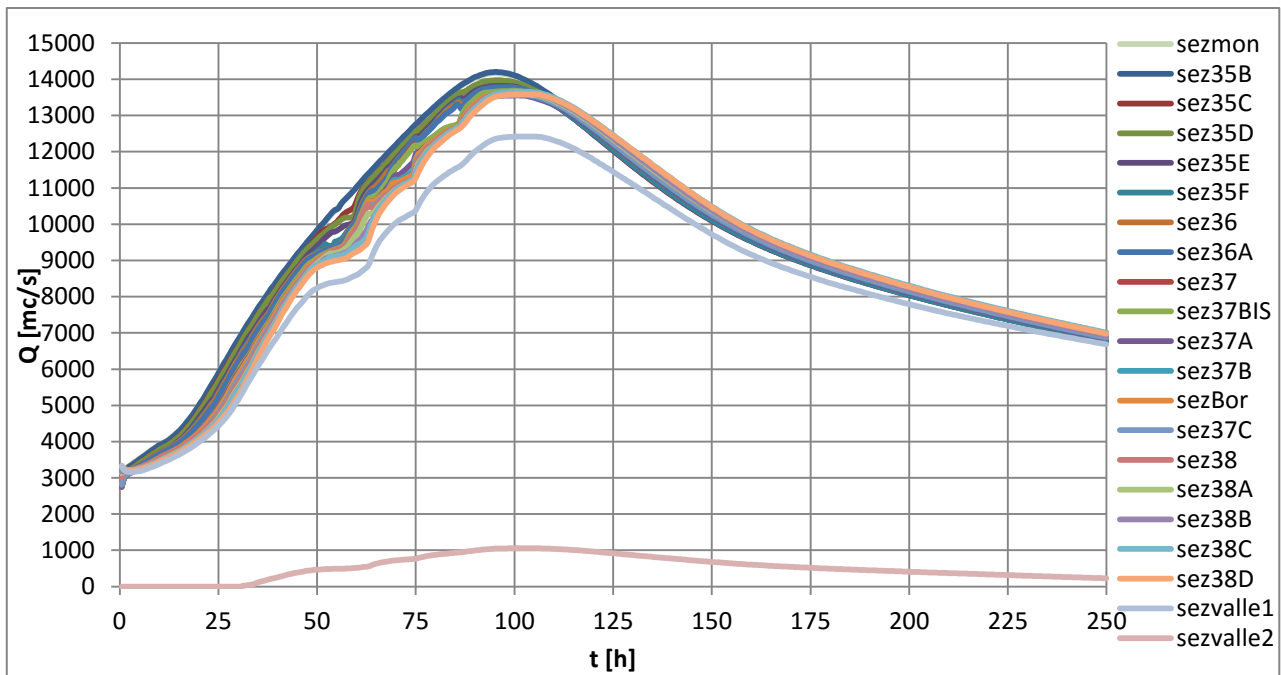


Fig.4.5 Esemplio andamento delle portate nelle sezioni.

4.3 Restituzione dei livelli

Per potere individuare l'andamento della quota idrica di un punto durante tutto l'arco della simulazione si utilizza un ulteriore file testo denominato *runlivelli*, la cui struttura è raffigurata in Fig.4.6. In questo caso è necessario inserire le coordinate planimetriche X, Y del punto del quale si vuole conoscere l'andamento dei livelli e, analogamente al caso dei precedenti due tipi di file, si ha che:

- frame_start=xxxx: indica il frame al quale iniziare ad effettuare il decode;
- frame_end=xxxx: indica il frame al quale terminare il decode.

```
#!/bin/bash

percorso="./"
nome_caso_test="prova47"
nome_file=${percorso}/${nome_caso_test}"-output-0000"
swegpu="./../bin/swegpu"

frame_start=0
frame_end=675

${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_Boretto_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 623328.01887451 4973985.8518089 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_valle_main_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 629118.87035848 4977323.2876549 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_valle_left_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 628903.34307661 4977434.499499 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_valle_right_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 629339.02546388 4977207.6667518 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_valle_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 629104.9339328 4977330.2598982 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_1_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 612245.41254942 4981252.092886 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_2_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 612666.86130034 4980426.0533342 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_3_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 612759.58002554 4979802.3091828 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_4_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 612725.86412547 4979018.4145061 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_5_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 612700.57720041 4978301.9516296 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_6_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 612894.44362583 4977610.775678 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_7_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 613408.61110195 4977155.6110271 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_8_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 614352.656304 4977096.6082019 -res=1
${swegpu} -decode ${nome_file}.WSE ${percorso}liv_9_${nome_caso_test}.txt -frames $frame_start $frame_end -point 615625.43153176 4977096.6082019 -res=1
```

Fig.4.6 Struttura del file *runlivelli*.

5 Taratura e validazione del modello

Le fasi di taratura e di validazione del modello sono le fasi più delicate dell'intero studio. Si tratta infatti di verificare che il modello realizzato nelle fasi precedenti simuli e riproduca correttamente e coerentemente eventi di piena realmente accaduti e per i quali si hanno dati storicamente osservati.

È importante specificare che nel presente studio non si sono considerati i contributi dei due torrenti Parma e Crostolo presenti nel dominio di calcolo (che, tuttavia, possono essere interessati da fenomeni di rigurgito verso monte che a loro volta possono contribuire al sormonto delle arginature circostanti) ma lontani dalla zona di interesse. Per alcune simulazioni si è tenuto conto del contributo del torrente Enza in quanto nelle immediate vicinanze della zona oggetto di studio.

Nel caso in esame si sono sfruttati i dati storicamente osservati in corrispondenza dell'idrometro di pertinenza IDRODG di Boretto (RE).

L'obiettivo è quello di simulare gli eventi nel modo più realistico possibile: i livelli simulati a Boretto per quell'evento e i livelli effettivamente osservati per quello stesso evento devono essere tra di loro corrispondenti o comunque differire entro un limite di accettabilità. In tal modo si ha la certezza di avere a disposizione un modello che riproduce correttamente la realtà.

L'eventuale differenza tra i dati simulati e i dati sperimentalmente osservati sono da attribuire essenzialmente a tre fattori diversi:

- limiti del modello matematico relativamente alle equazioni adottate;
- carenze nella discretizzazione numerica;
- imperfetta conoscenza delle condizioni iniziali e/o delle condizioni al contorno e mancata o carente calibrazione dei parametri del modello.

Il modello non tiene conto di alcuni fenomeni che possono avere un ruolo significativo durante un evento di piena quali rotture, naturali e/o artificiali di argini. Pertanto nelle simulazioni l'invaso delle golene è determinato solamente dal sormonto dell'arginatura golenale. Anche gli interventi umani effettuati durante una

piena (sacchettature e/o di riporti su argini eventualmente effettuate nel corso dell'evento) non sono state tenute in conto.

Il principale parametro che gioca un ruolo determinante nelle simulazioni è quello relativo alla scabrezza, della quale si tiene conto nel file .MAN e nel file .BCC (nella parte in cui si definiscono le scale delle portate).

La prima parte di questa fase passa sotto il nome di taratura, con la quale si determina se il modello restituisce dati simulati accettabili nei confronti dei dati osservati per un determinato evento. Successivamente si passa alla fase di validazione, la quale serve per evitare che il modello sia particolarmente performante nei confronti di un solo evento storico e poco flessibile nei confronti di altri; si sono simulati dunque altri due eventi osservati e diversi dal primo per verificare ulteriormente la bontà dei risultati ottenuti anche per questi ultimi due.

I tre eventi scelti sono relativi ad altrettanti importanti eventi di piena verificatisi su un orizzonte temporale di 14 anni:

1. Evento di piena dell'ottobre 2000;
2. Evento di piena dell'aprile-maggio 2009;
3. Evento di piena del novembre 2014.

Dal momento che non vi sono a disposizione né la scala delle portate né informazioni sulle portate transanti a Casalmaggiore per questi eventi ma solamente l'andamento dei livelli, si è provveduto a costruire una scala delle portate a Casalmaggiore sulla base di precedenti simulazioni e da questa si sono trasformati i livelli osservati in portata transante per potere determinare l'onda di piena in ingresso di quell'evento.

In particolare prima si è ricavata una scala delle portate a partire da una simulazione con un'onda sintetica avente forma di una funzione Gamma in ingresso (vedi *Fig.5.1* e *Fig.5.2*).

Successivamente si è interpolato il ramo di risalita con una relazione di potenza (vedi *Fig.5.3*) per avere una scala biunivoca dalla quale poter trasformare i livelli osservati in portate (mediante una semplice inversione della formula).

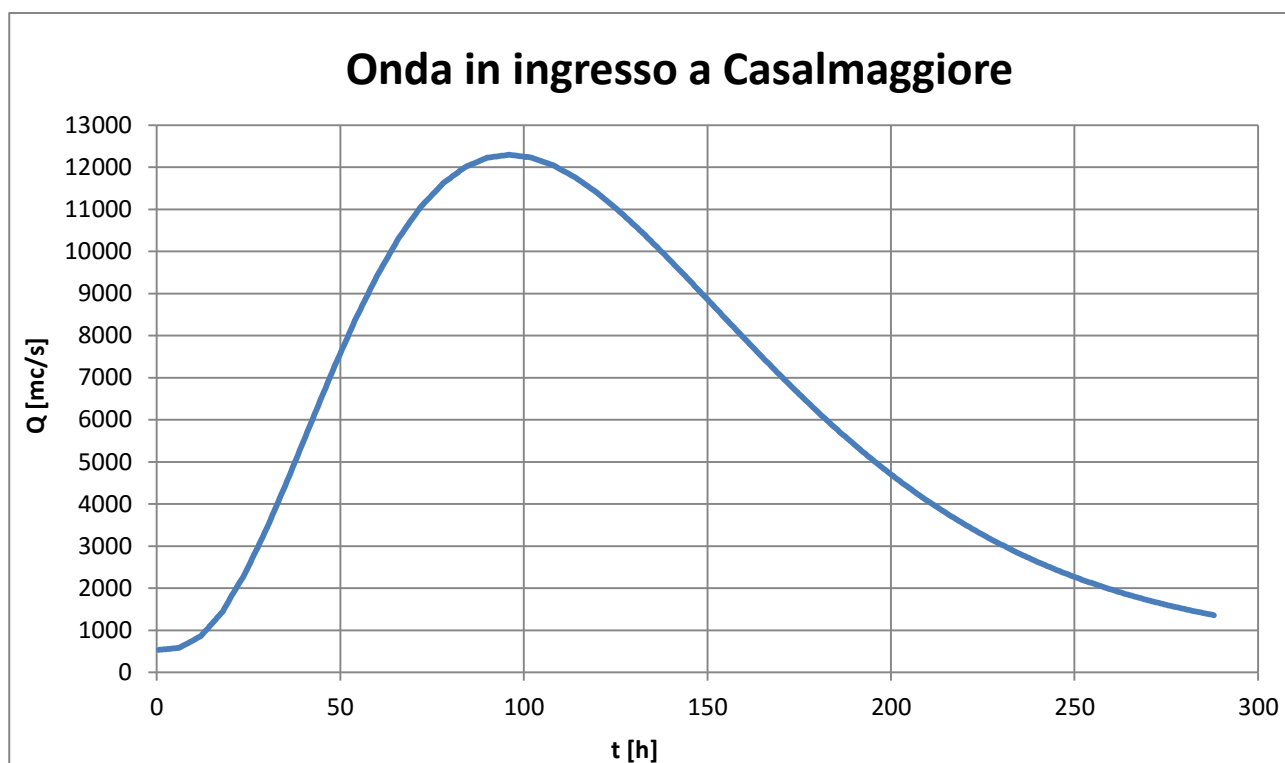


Fig.5.1 Onda sintetica in ingresso a Casalmaggiore.

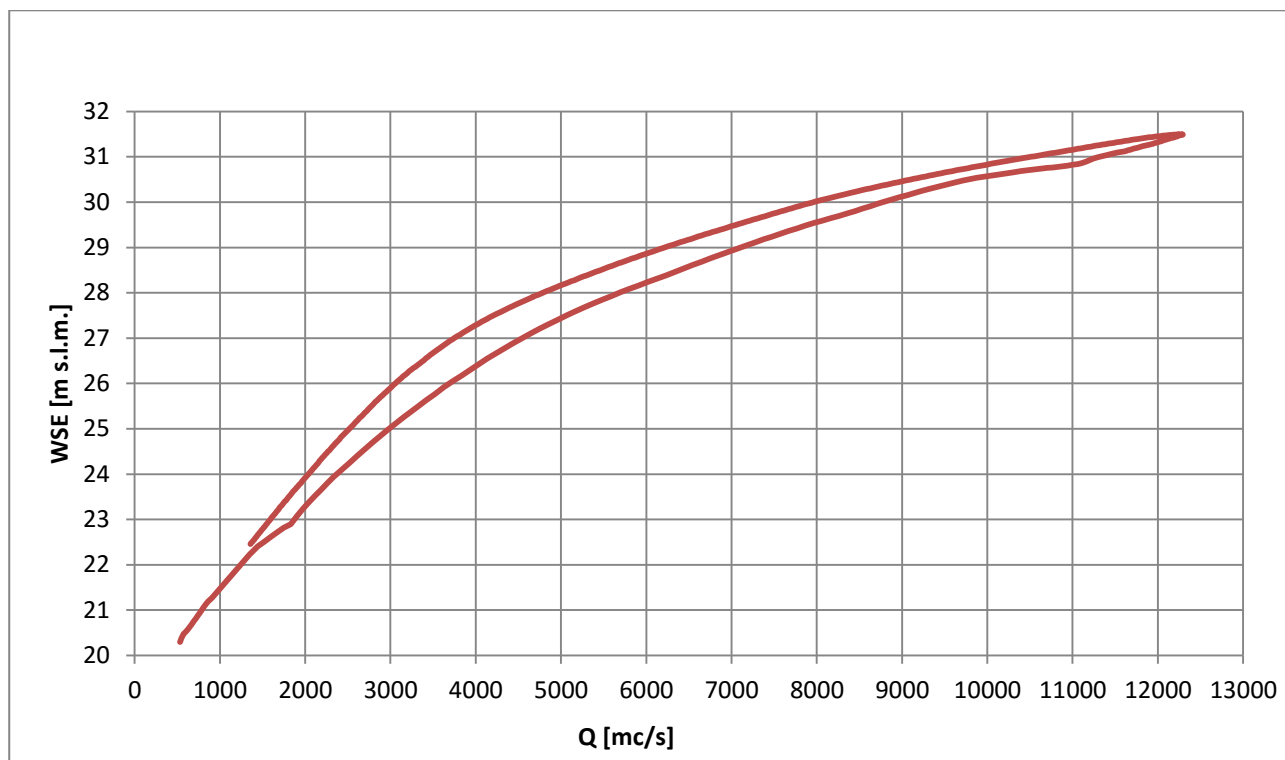


Fig.5.2 Legame quota idrica-portata ottenuta a Casalmaggiore.

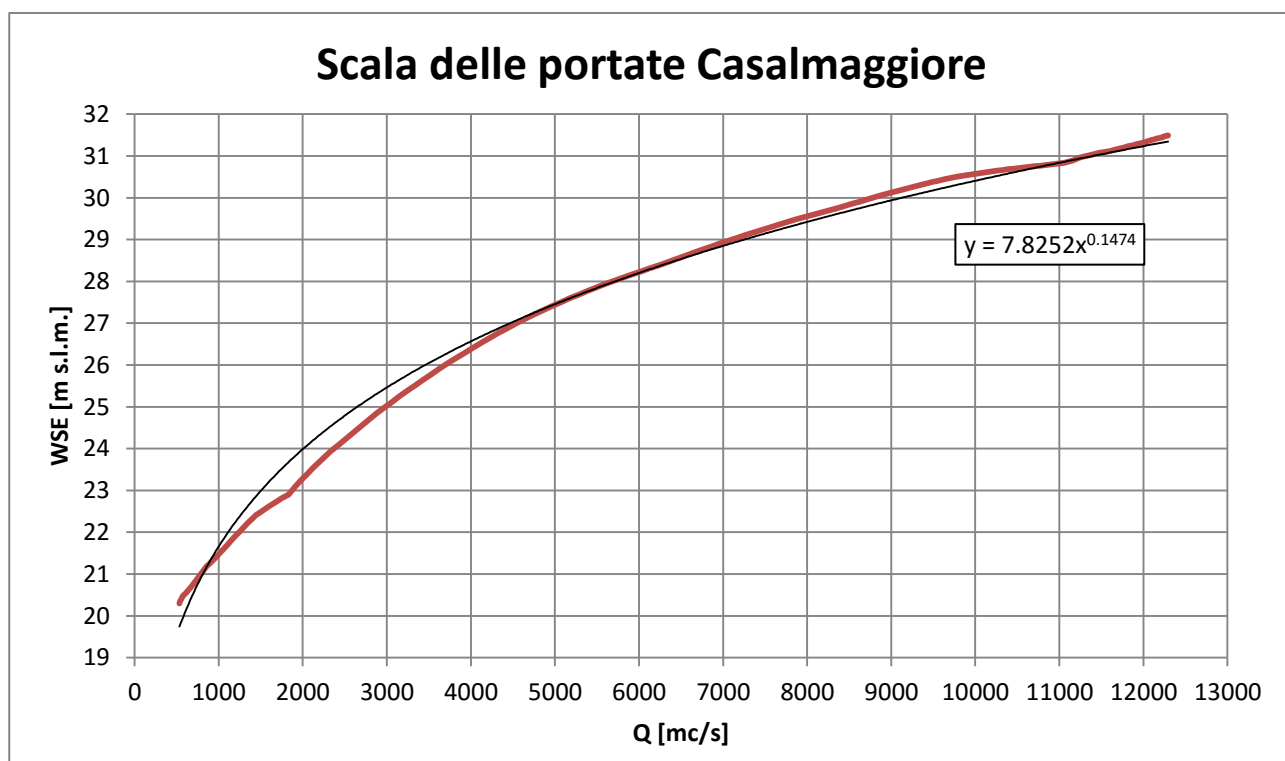


Fig.5.3 Scala delle portate univoca interpolata a Casalmaggiore.

Oltre a considerare il livelli idrici per tutto lo sviluppo dell'argine di Ghiarole si è anche provveduto ad analizzare i 5 punti più depressi dell'arginatura stessa. I punti sono evidenziati in Fig.5.4 e hanno rispettivamente una quota pari a:

- Punto 1: 29.30 m s.l.m.;
- Punto 2: 29.36 m s.l.m.;
- Punto 3: 29.42 m s.l.m.;
- Punto 4: 29.33 m s.l.m.;
- Punto 5: 29.20 m s.l.m. (nel rilievo vi sono un punto a 28.96 m s.l.m. e un punto a 29.08 m s.l.m., ma si tratta di un punto depresso contornato da altri punti ad una quota superiore, pari appunto al massimo a 29.20 m s.l.m.).

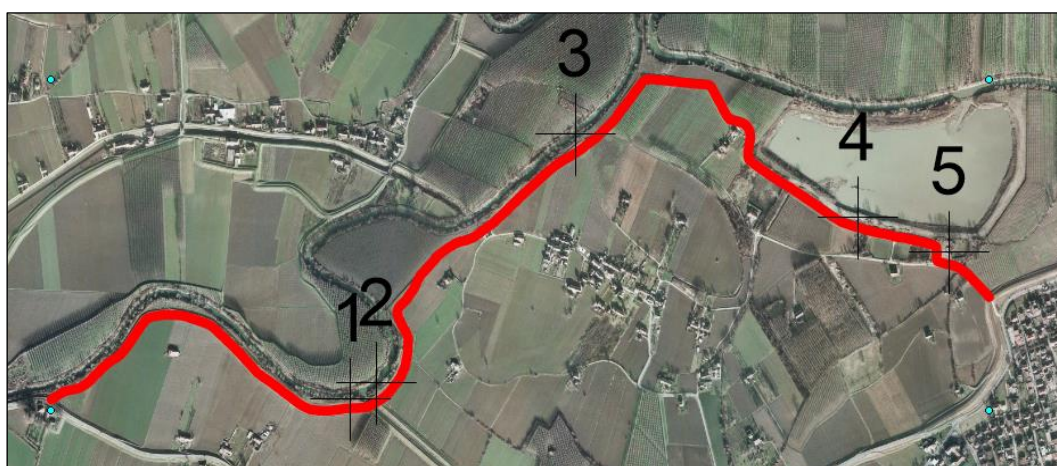


Fig.5.4 Punti depressi in evidenza lungo l'argine di Ghiarole.

5.1 Evento ottobre 2000

Nell'ottobre del 2000 si è registrato il più importante evento di piena del fiume Po dopo quello del 1951. Il modello di calcolo è stato utilizzato per simulare un totale di 288 ore, vale a dire 12 giorni. La simulazione riproduce l'evento di piena tra le ore 00:30 del 15/10/2000 le ore 00:30 del 27/10/2000.

In Fig.5.5 è rappresentata l'onda di piena in ingresso a Casalmaggiore per questa simulazione.

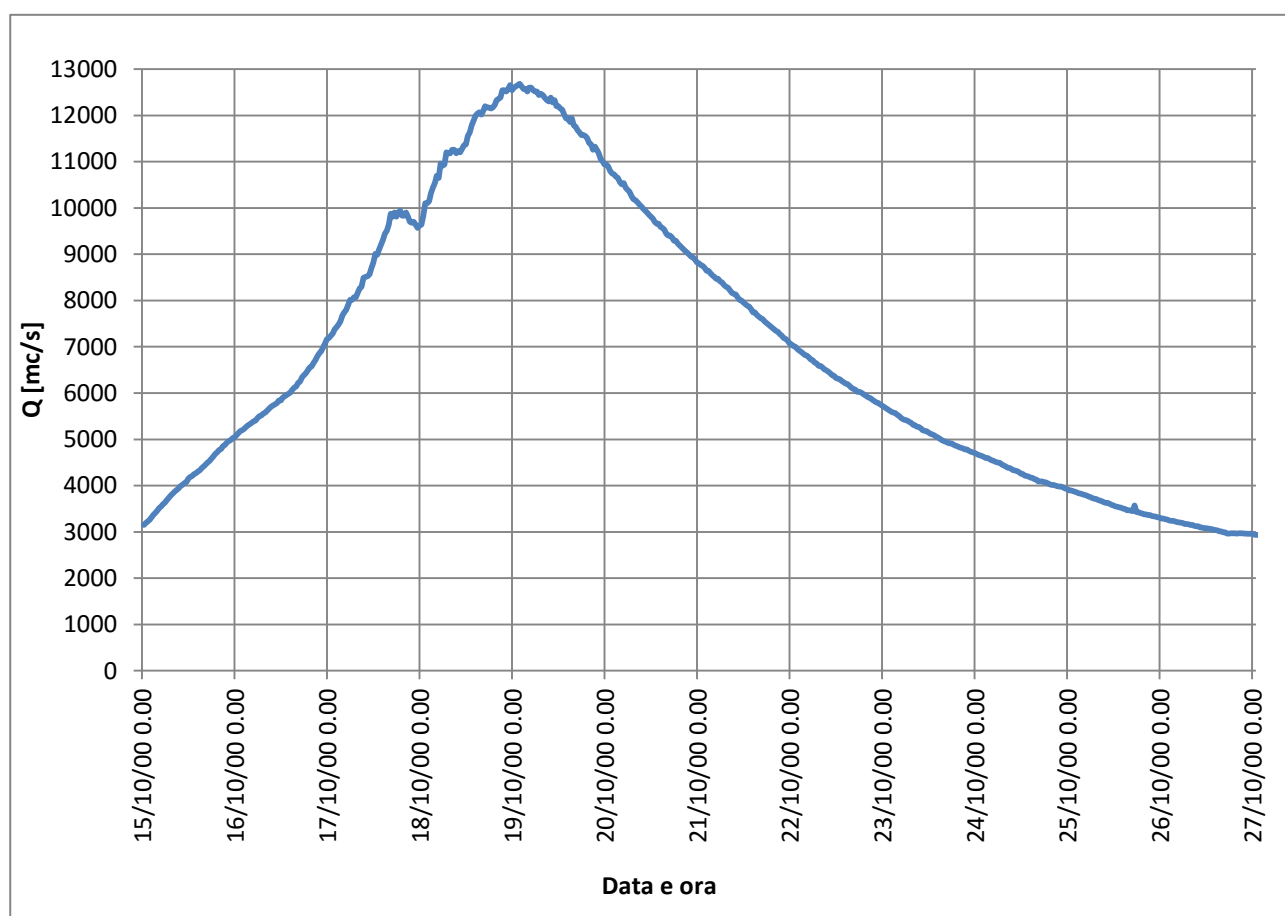


Fig.5.5 Onda in ingresso a Casalmaggiore per l'evento dell'ottobre 2000.

Si è provveduto a decodificare l'andamento dei livelli in corrispondenza di Boretto per confrontarli con quelli osservati nella stessa sezione. Occorre ricordare che lo zero idrometrico a Boretto nel 2000 era pari a 20.02 m s.l.m..

In Fig.5.6 si possono osservare risultati concordanti che suggeriscono il superamento della fase di taratura. Per una simulazione che dura quasi 2 settimane l'istante temporale per il quale si verifica il colmo è stato simulato con buonissima precisione: nella simulazione infatti il colmo è raggiunto alle ore 07:30 del 19/10/2000 e nella

realtà si è osservato esattamente allo stesso istante di tempo, cioè sempre alle ore 07:30 del 19/10/2000.

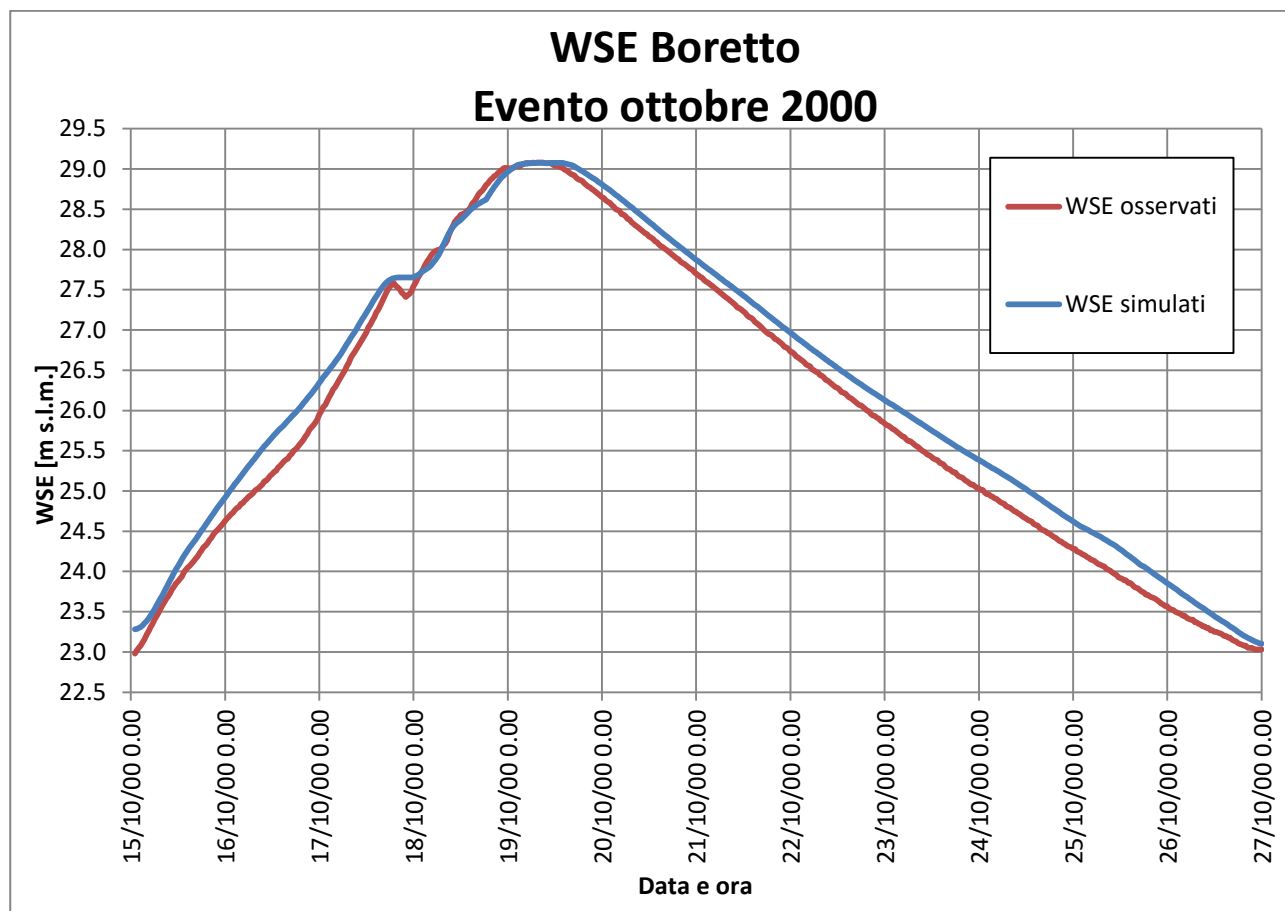


Fig.5.6 Confronto delle quote idriche a Boretto.

Anche i livelli raggiunti nel momento del colmo sono tra loro identici (29.08 m s.l.m. nella simulazione e 29.08 m s.l.m. nella realtà).

Per questa simulazione vengono riportate, a titolo di esempio (in *Fig.5.7*, *Fig.5.8*, *Fig.5.9* e *Fig.5.10*), le scale delle portate in corrispondenza dei quattro segmenti definiti dai file .BCC e .BLN e quelle ottenute dalla simulazione. Si evince che il modello di calcolo ha ben letto e restituito le scale delle portate che sono state inserite nel file .BCC.

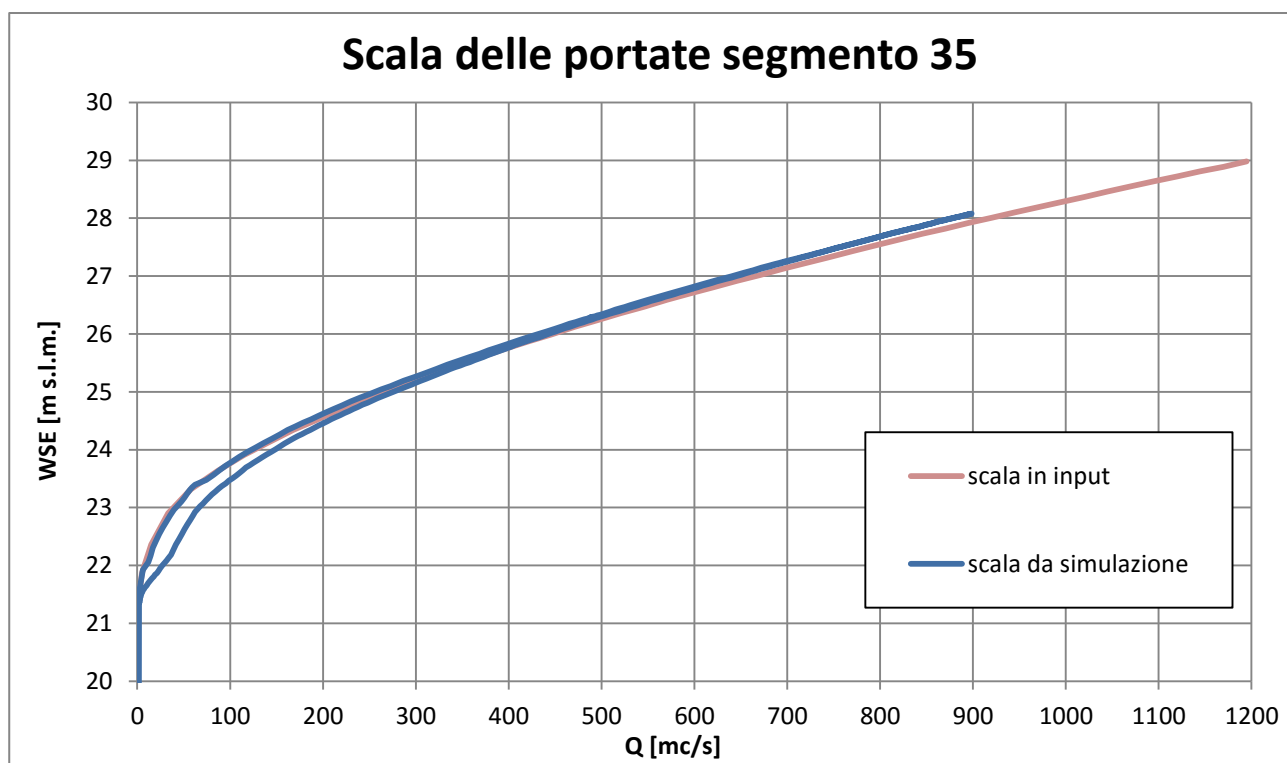


Fig.5.7 Confronto tra le scala delle portate per il segmento 35.

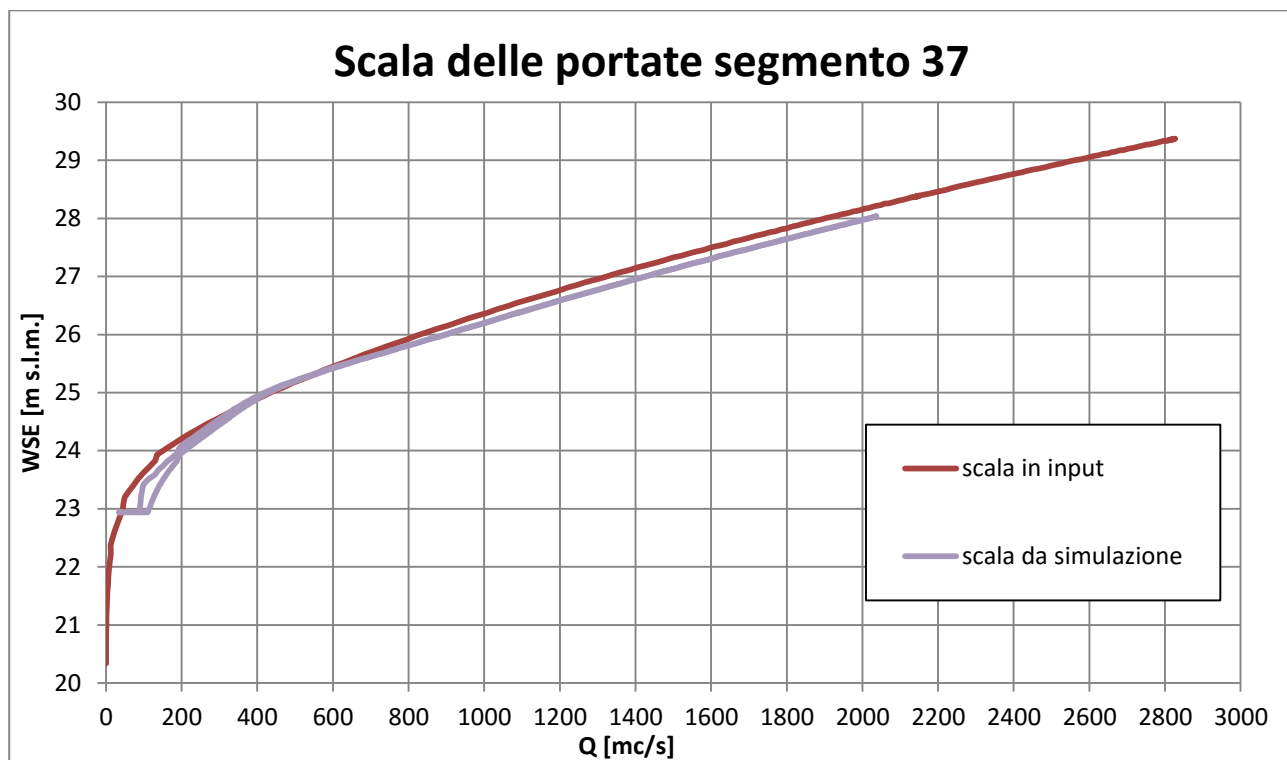


Fig.5.8 Confronto tra le scala delle portate per il segmento 37.

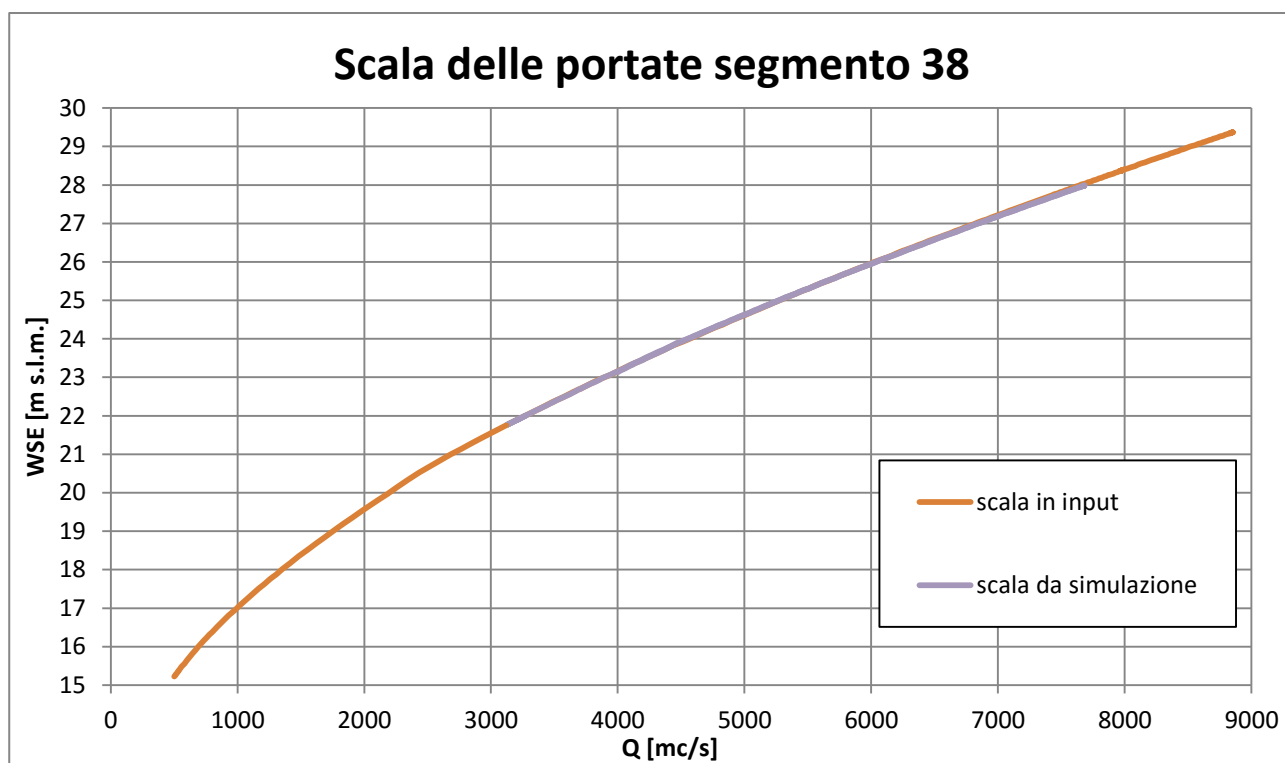


Fig.5.9 Confronto tra le scala delle portate per il segmento 38.

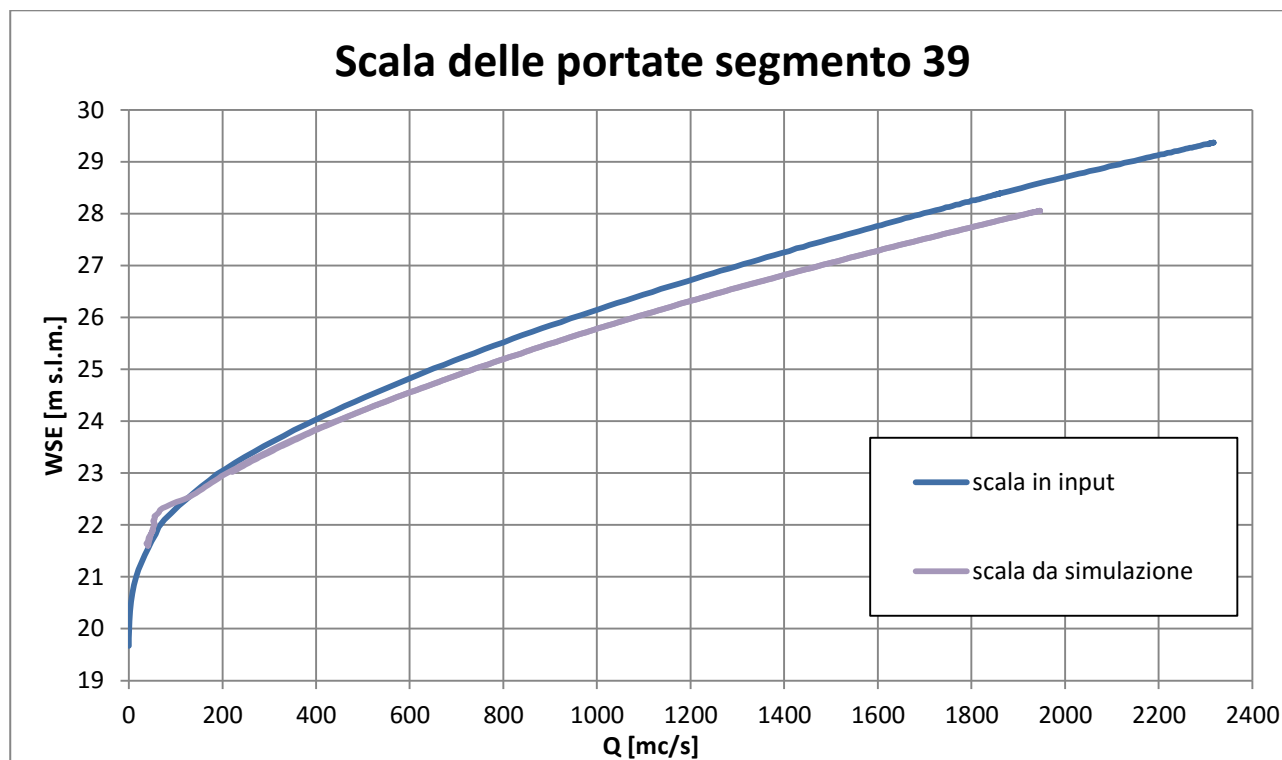


Fig.5.10 Confronto tra le scala delle portate per il segmento 39.

Per quanto riguarda la golenale di Ghiarole si ricorda che l'invaso di quest'ultima non è avvenuto solamente grazie ad un intervento tempestivo di sacchettatura che ha interessato l'argine consortile su più punti. Questo intervento è difficilmente quantificabile in quanto non si conoscono con precisione né le tempistiche di intervento né l'entità del riporto effettuato. Per questi motivi tale intervento non è stato tenuto in considerazione nella simulazione. Dalla simulazione risulta che la golenale si sarebbe invasata per tracimazione dell'argine golenale quasi ovunque. Analizzando i livelli nei 5 punti critici (più bassi) lungo l'argine golenale si osserva come il massimo valore di livello idrico raggiunto si assesta a 29.77 m s.l.m. a valle dell'argine e a 29.87 m s.l.m. a monte, superando le quote maggiori dell'argine di circa 30 centimetri e superando le quote dei punti critici fino ad un massimo di 57 cm sia a monte che a valle. Tali differenze possono essere osservate nelle *Fig.5.11*, *Fig.5.12*, *Fig.5.13*, *Fig.5.14* e *Fig.5.15*.

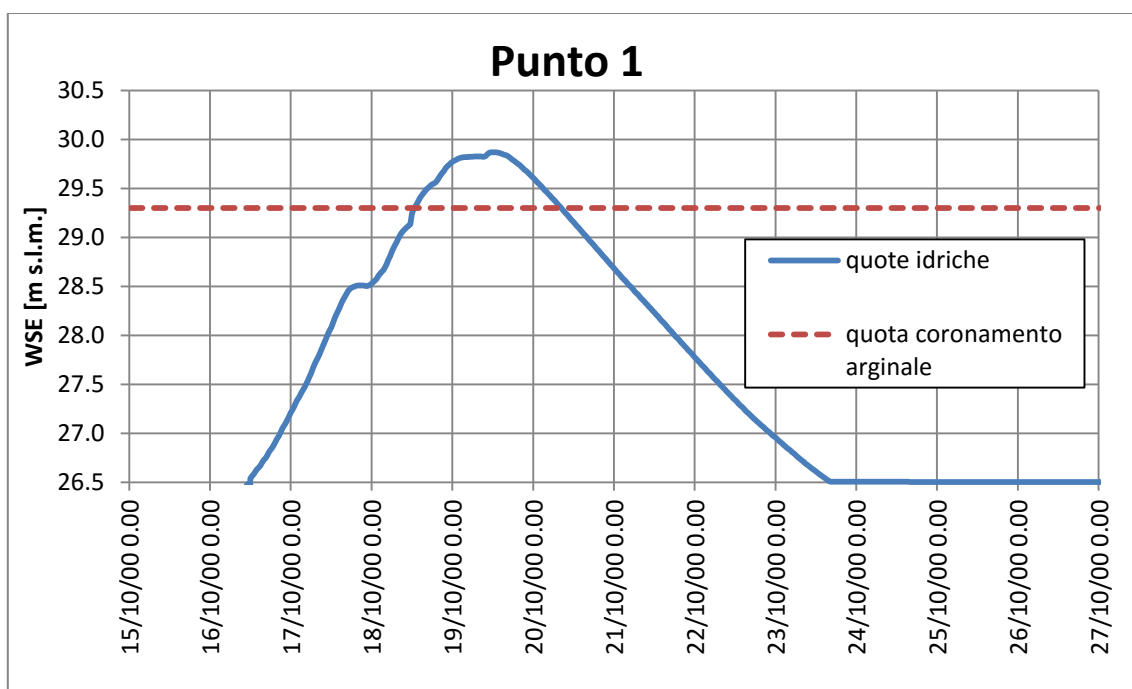


Fig.5.11 Andamento dei livelli per il punto 1.

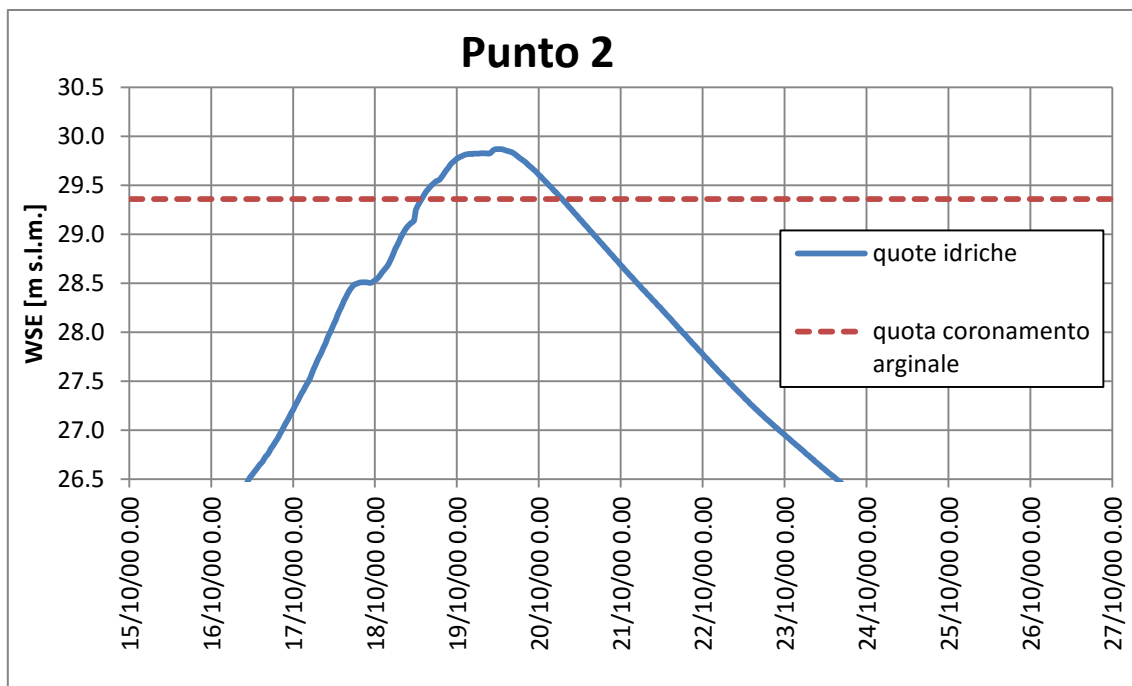


Fig.5.12 Andamento dei livelli per il punto 2.

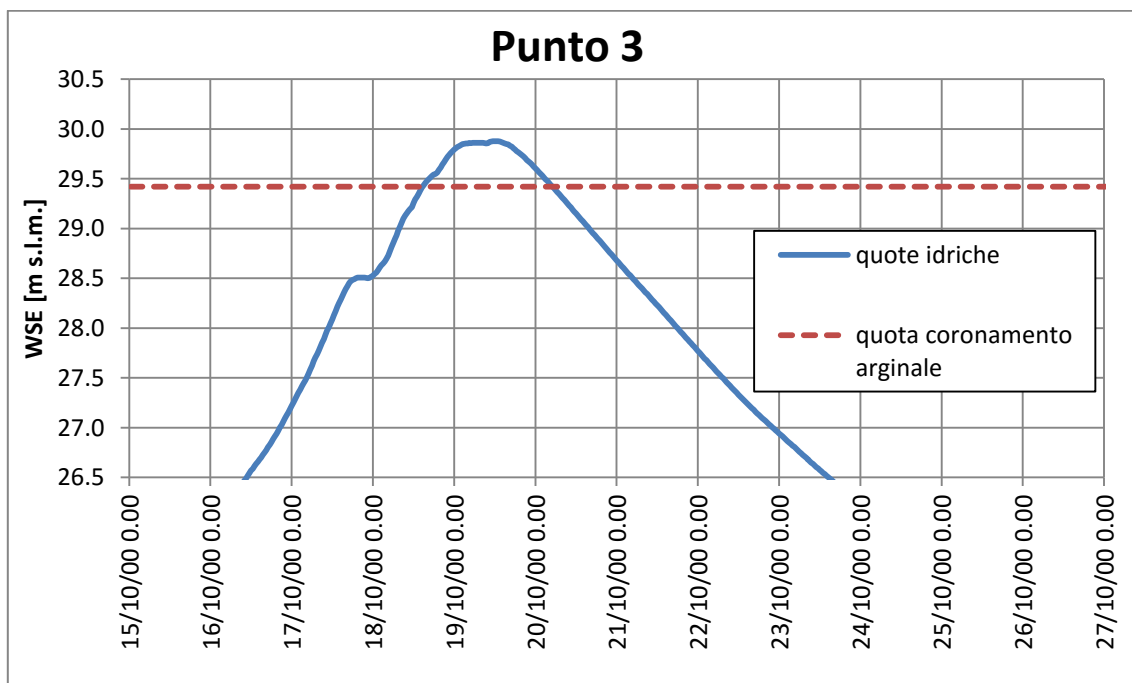


Fig.5.13 Andamento dei livelli per il punto 3.

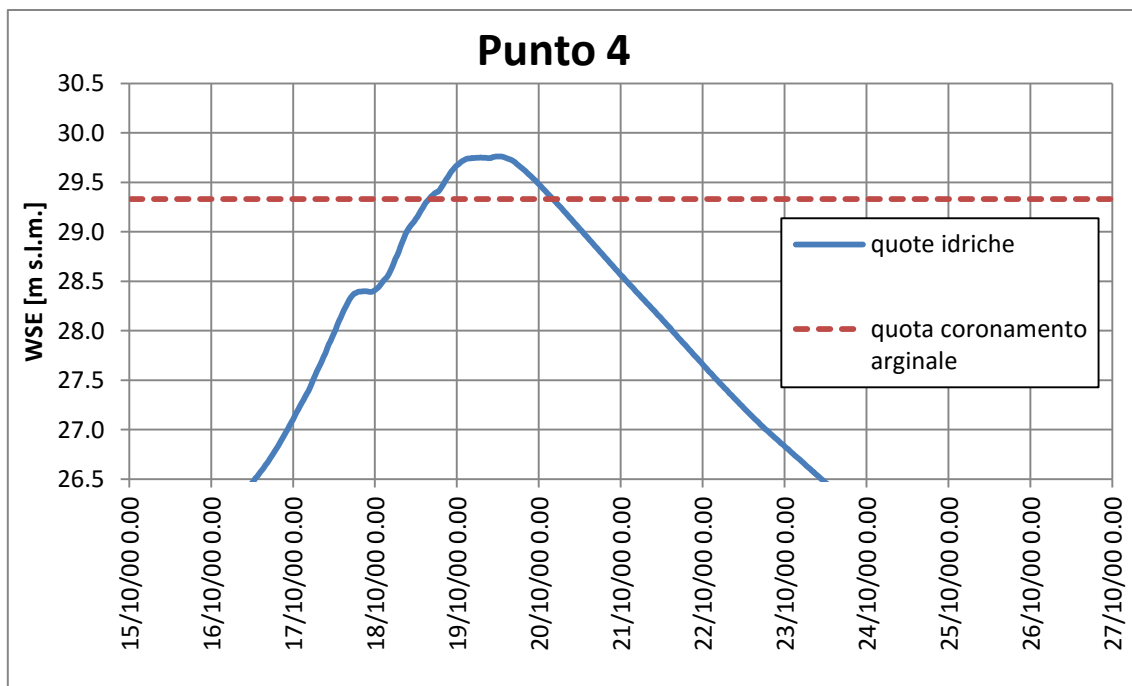


Fig.5.14 Andamento dei livelli per il punto 4.

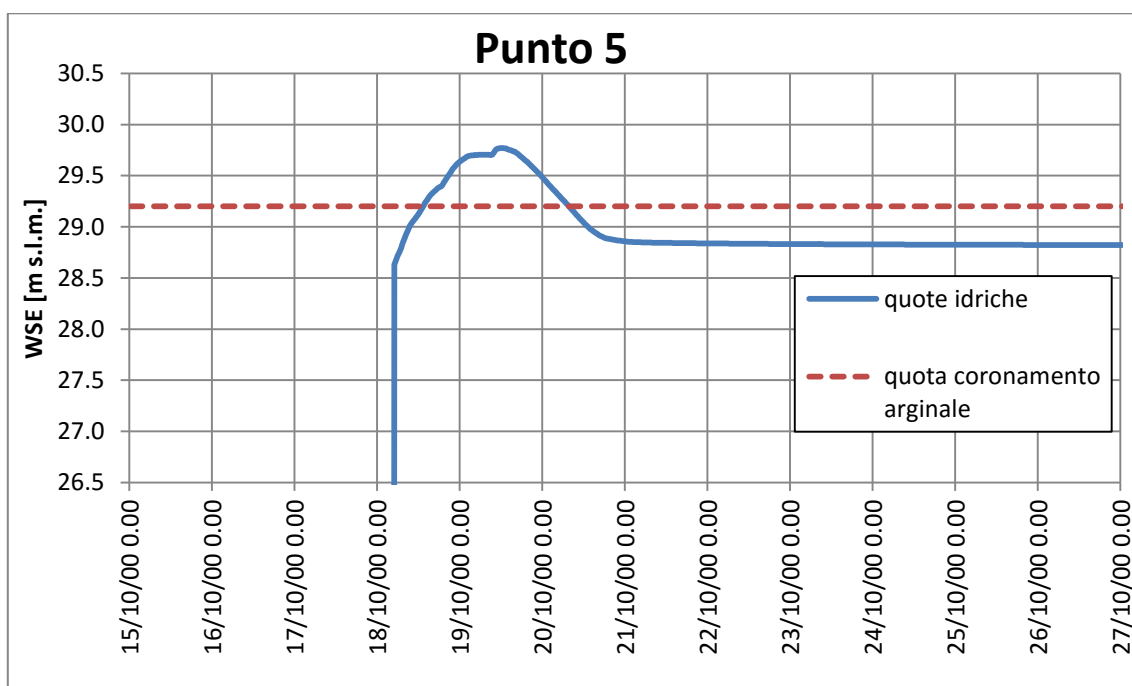


Fig.5.15 Andamento dei livelli per il punto 5.

L'inizio dell'invaso della golena si sarebbe verificato attorno alle ore 13:00 del 18 ottobre 2000 in corrispondenza del punto 1 (corda molle sul coronamento arginale in

corrispondenza della chiavica di Scutellara-Canalazzo), seguito a valle dal punto 2 (circa un'ora dopo). In Fig.5.16 si riporta il dettaglio delle quote idriche in corrispondenza dell'istante di ipotetico inizio tracimazione della golena.

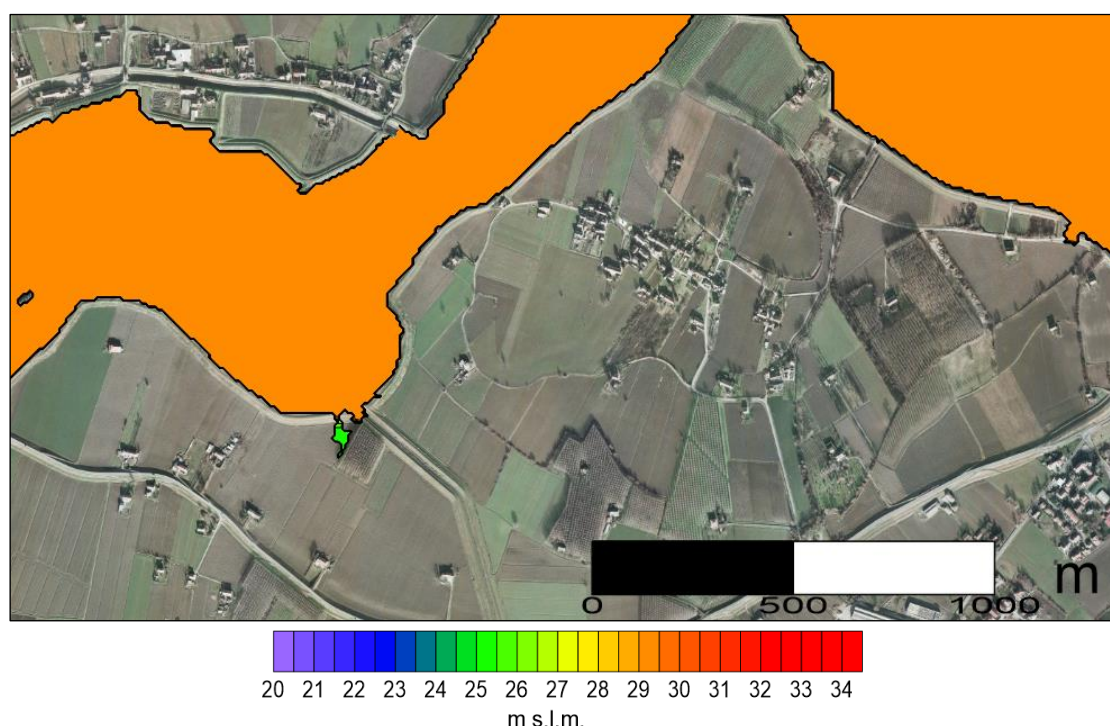


Fig.5.16 Quote idriche e zona di ipotetico inizio della tracimazione dell'argine golenale.

In Fig.5.17 è riportato l'inviluppo delle quote idriche massime ottenute dalla simulazione nell'evento dell'ottobre 2000.

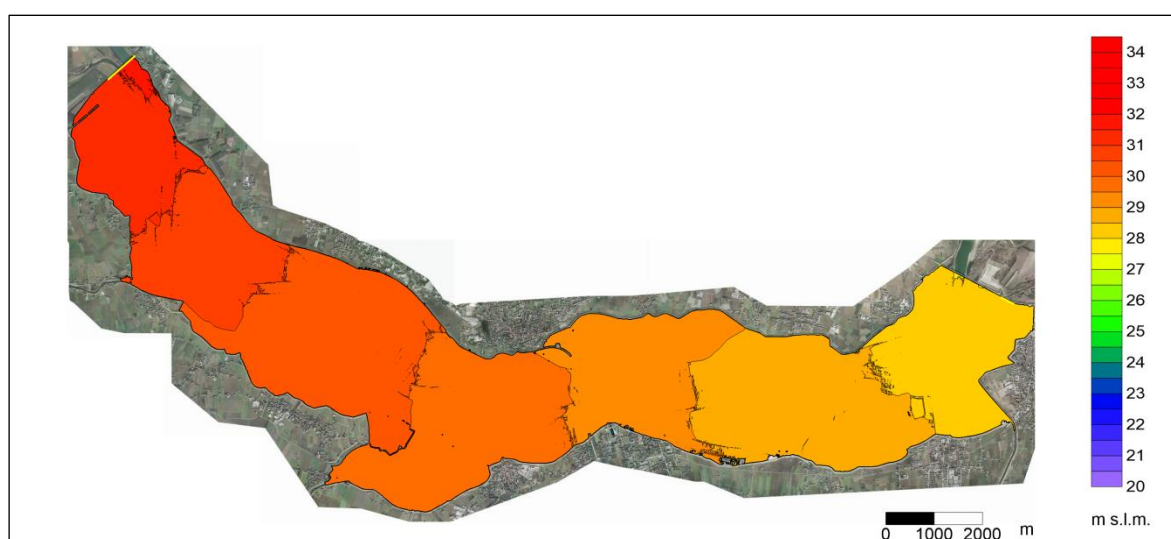


Fig.5.17 Inviluppo delle quote idriche massime per la simulazione dell'evento dell'ottobre 2000.

5.2 Evento aprile-maggio 2009

Una volta completata la fase di taratura si è passati alla fase di validazione. Il secondo evento simulato si colloca tra l'aprile e il maggio del 2009. Il modello di calcolo è stato utilizzato per simulare 138 ore, cioè 5 giorni e 18 ore. La simulazione riproduce l'evento di piena tra le ore 06:30 del 28/04/2009 le ore 00:30 del 4/05/2009. Per questa simulazione si è anche tenuto in conto dell'evento di piena avvenuto nello stesso periodo sull'Enza, in quanto non del tutto trascurabile.

In *Fig.5.18* e in *Fig.5.19* sono rappresentate le onde di piena in ingresso a Casalmaggiore sul Po e a Coenzo sull'Enza per questa simulazione.

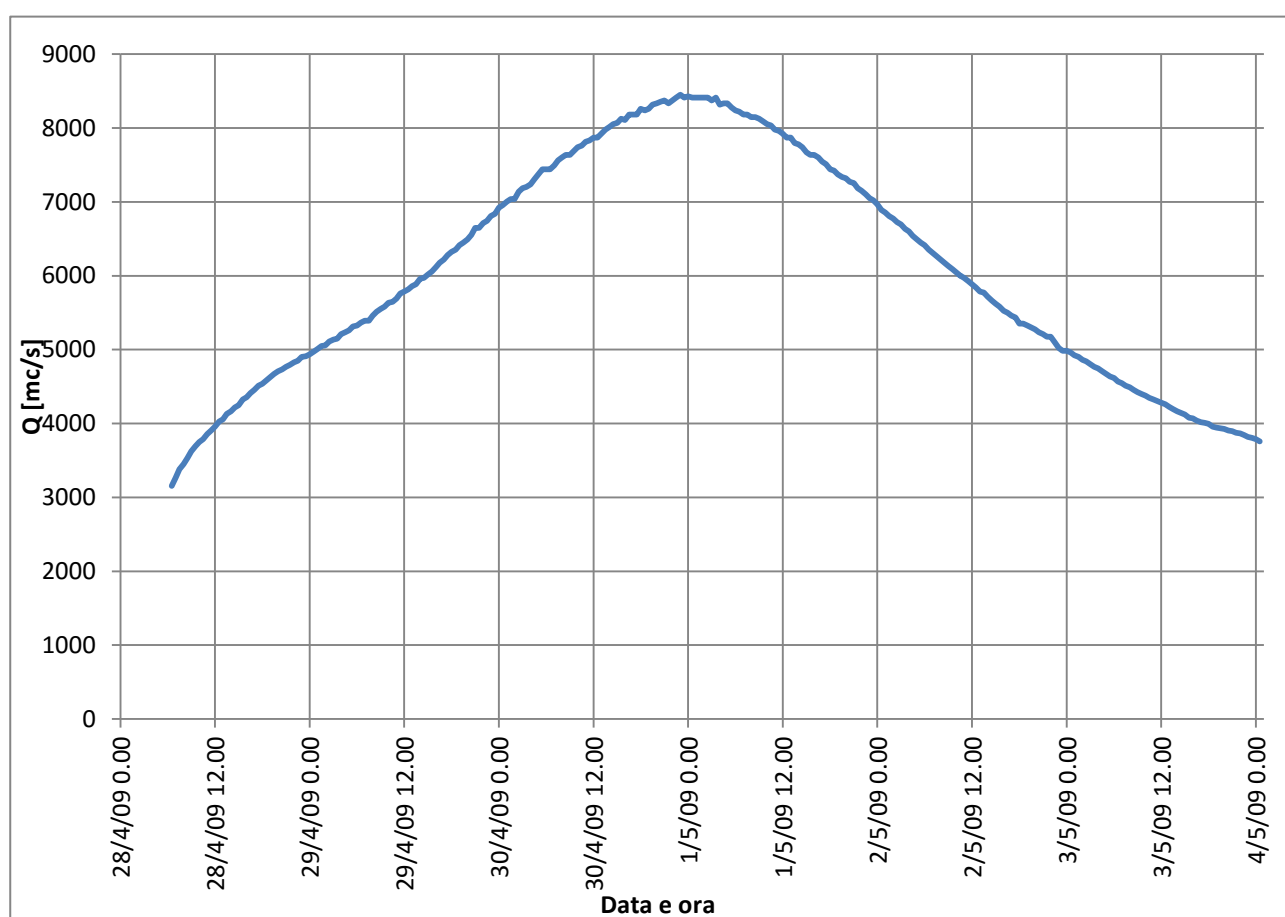


Fig.5.18 Onda in ingresso a Casalmaggiore per l'evento dell'aprile-maggio 2009.

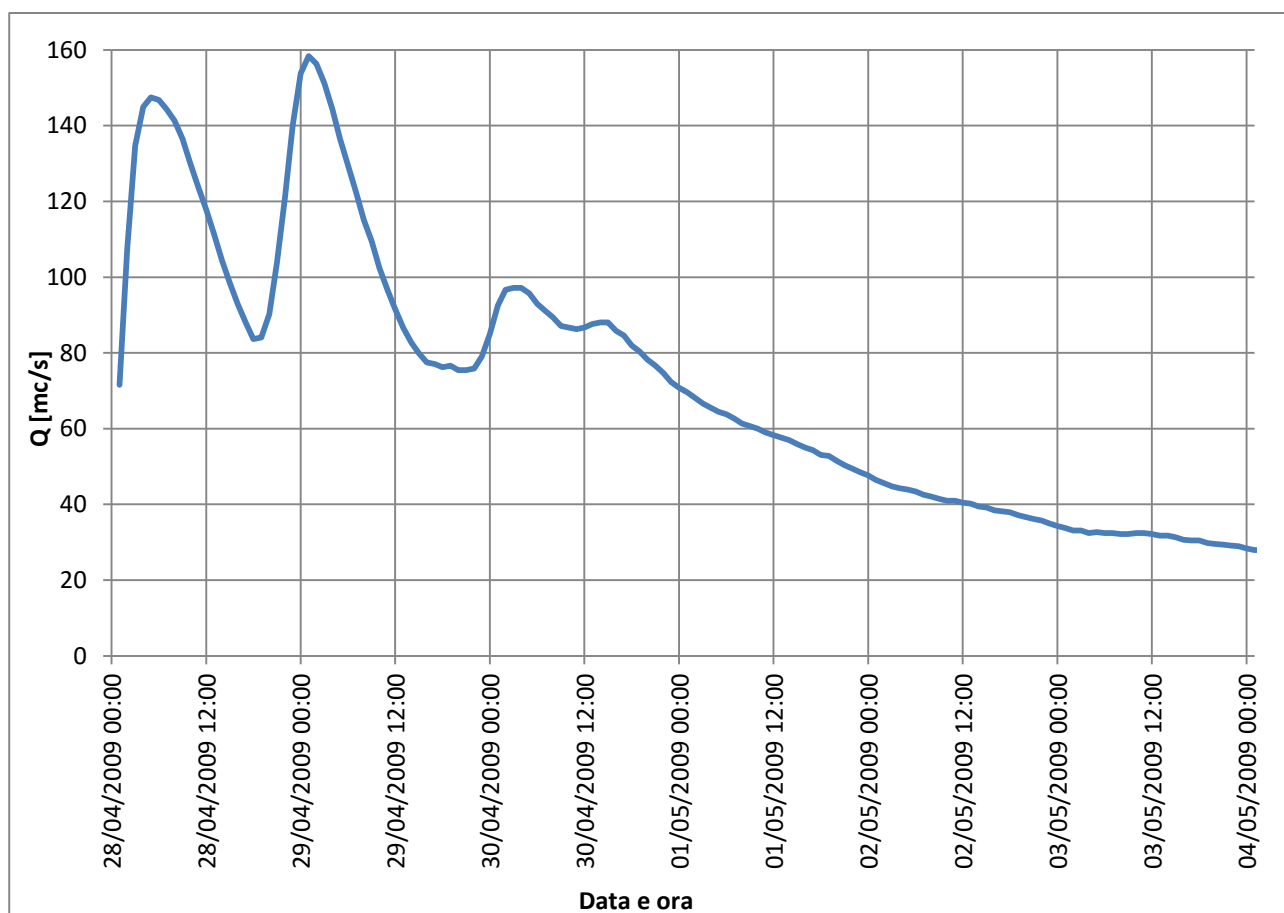


Fig.5.19 Onda in ingresso a Coenzo (torrente Enza) per l'evento dell'aprile-maggio 2009.

Successivamente si è provveduto a decodificare l'andamento dei livelli in corrispondenza di Boretto per confrontarli con quelli osservati sperimentalmente nella stessa sezione. Occorre ricordare che lo zero idrometrico a Boretto nel 2009 era pari a 19.90 m s.l.m.

In Fig.5.20 si può osservare come nella simulazione l'istante temporale per il quale si verifica il colmo è alle ore 02:00 del 01/05/2009, mentre nella realtà si è osservato 1 ora e mezza dopo, cioè alle ore 03:30 del 01/05/2009.

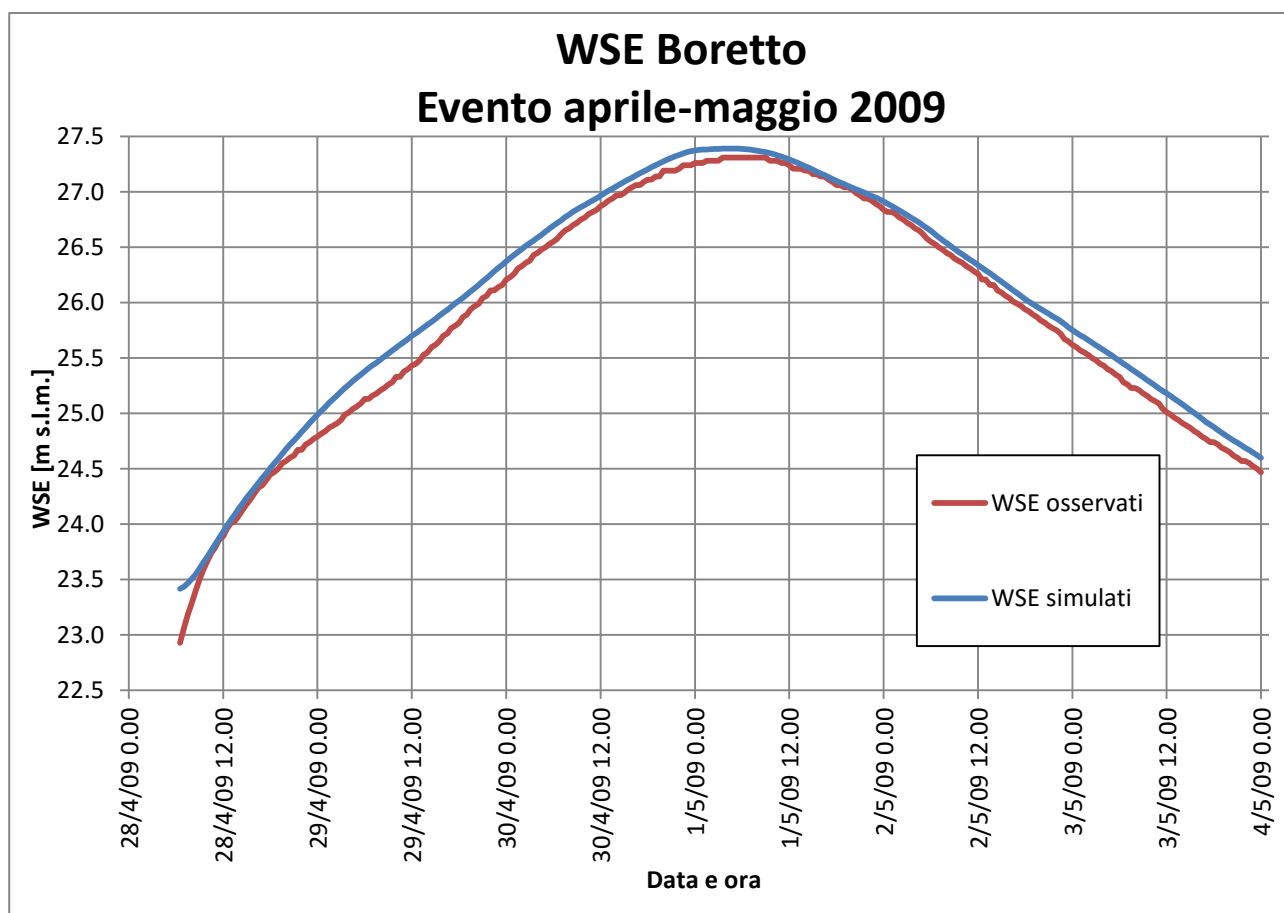


Fig.5.20 Confronto delle quote idriche a Boretto.

Per quanto riguarda invece l'andamento dei livelli, le quote idriche differiscono tra loro solamente di 8 centimetri in corrispondenza del valore corrispondente al colmo (27.39 m s.l.m. nella simulazione e 27.31 m s.l.m. nella realtà osservata). Anche questa lieve differenza di 8 centimetri sul colmo è considerata largamente accettabile e si può concludere che la simulazione riproduce fedelmente ciò che è accaduto nella realtà. Quindi questi risultati fanno comprendere come il modello sia performante non solo nei confronti dell'evento di piena rispetto al quale è stato tarato, ma anche nei confronti di un altro evento storico avvenuto 9 anni più tardi e che presenta durata e onda di piena in ingresso completamente differenti dal precedente.

Nell'evento del 2009 la golena non si è invasata e questo è quanto risulta anche nella simulazione di tale evento. In *Fig.5.21*, *Fig.5.22*, *Fig.5.23* e *Fig.5.24* si riporta l'andamento dei livelli nei punti critici dell'arginatura di Ghiarole (il punto 5 non viene bagnato). I valori massimi si assestano attorno a 28.48 m s.l.m. a monte e a 28.11 m s.l.m. a valle, con un franco ovunque superiore ad 1 metro.

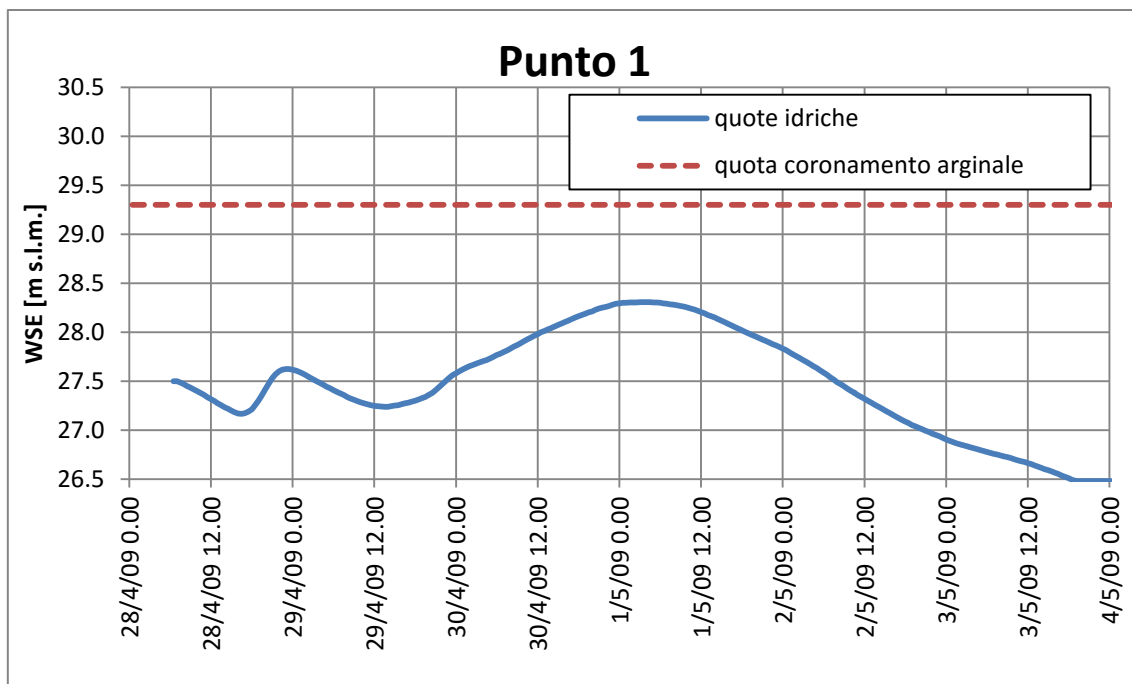


Fig.5.21 Andamento dei livelli per il punto 1.

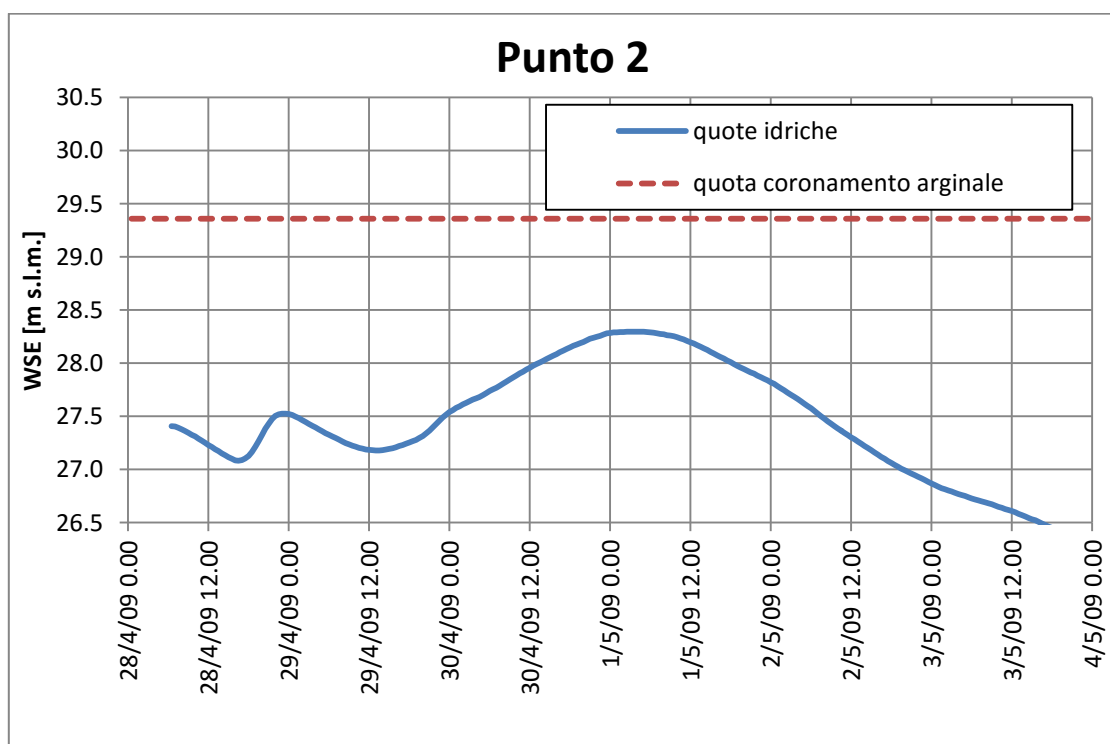


Fig.5.22 Andamento dei livelli per il punto 2.

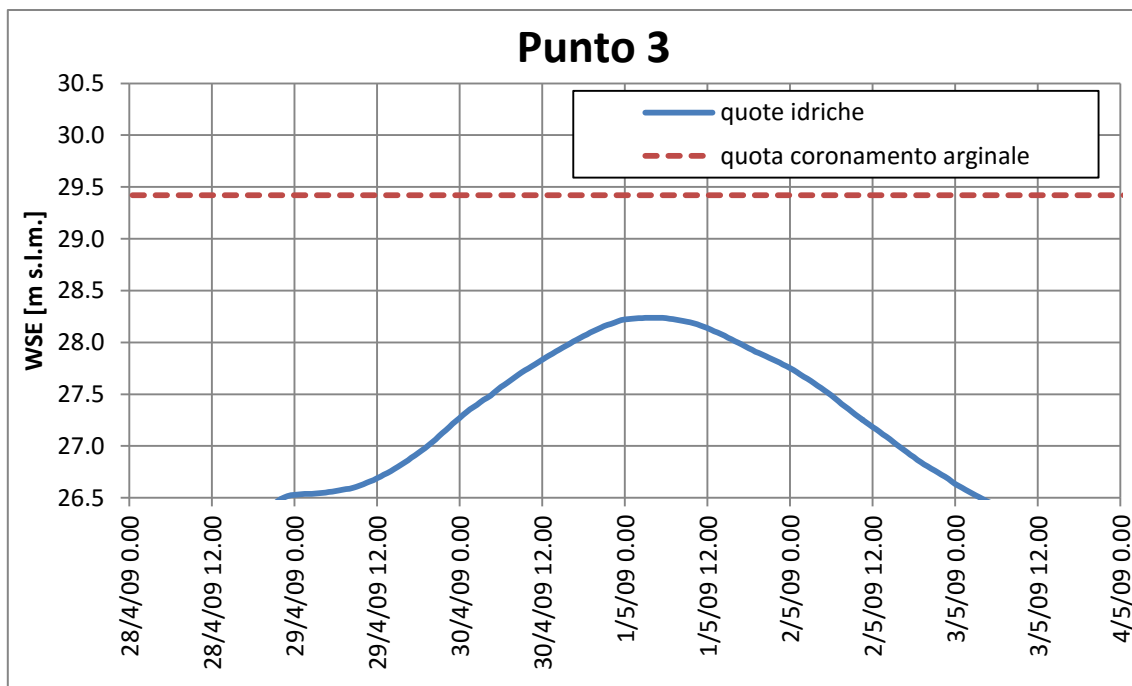


Fig.5.23 Andamento dei livelli per il punto 3.

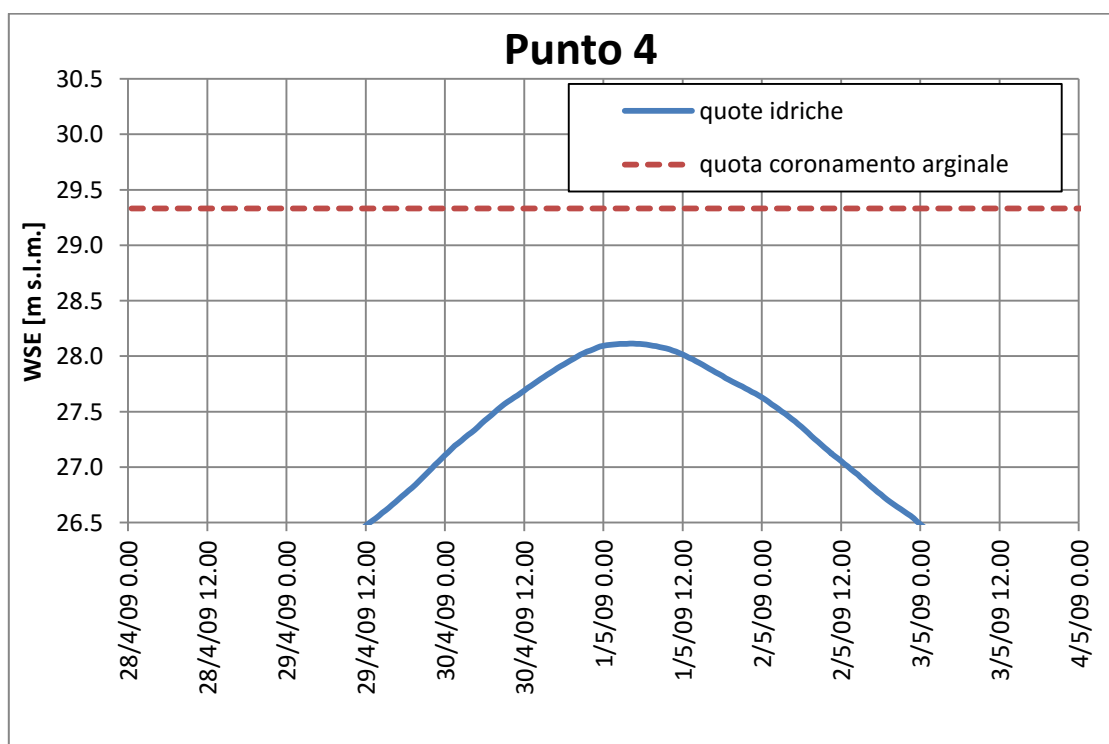


Fig.5.24 Andamento dei livelli per il punto 4.

Nella Fig.5.25 è riportato l'inviluppo delle quote idriche massime ottenute dalla simulazione nell'evento dell'aprile-maggio 2009.

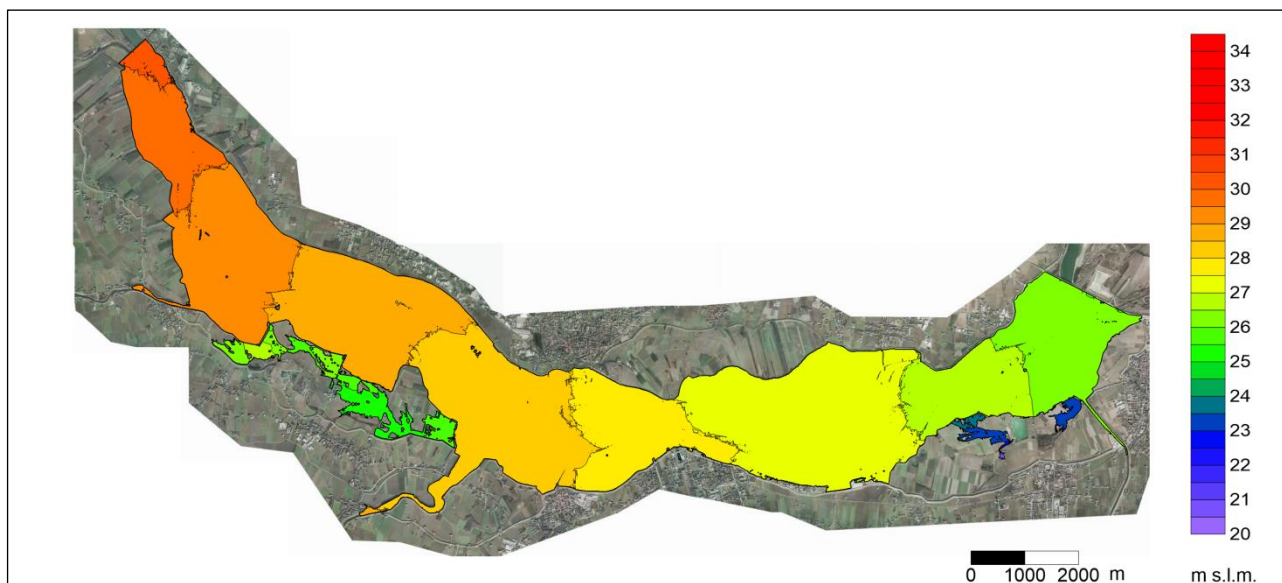


Fig.5.25 Inviluppo delle quote idriche massime per la simulazione dell'evento dell'aprile-maggio 2009.

5.3 Evento novembre 2014

Per completare la fase di validazione si è provveduto a simulare un terzo evento di piena. Questo evento è più recente e si colloca nel novembre del 2014. In particolare il modello di calcolo è stato utilizzato per simulare 270 ore, cioè 11 giorni e 6 ore. La simulazione riproduce l'evento di piena tra le ore 06:30 dell'11/11/2014 le ore 12:30 del 22/11/2014. Anche in questo caso si è considerato il contributo della piena del torrente Enza nello stesso periodo.

In Fig.5.26 e in Fig.5.27 sono rappresentate, per questa simulazione, le onde di piena in ingresso a Casalmaggiore sul Po e a Coenzo sull'Enza.

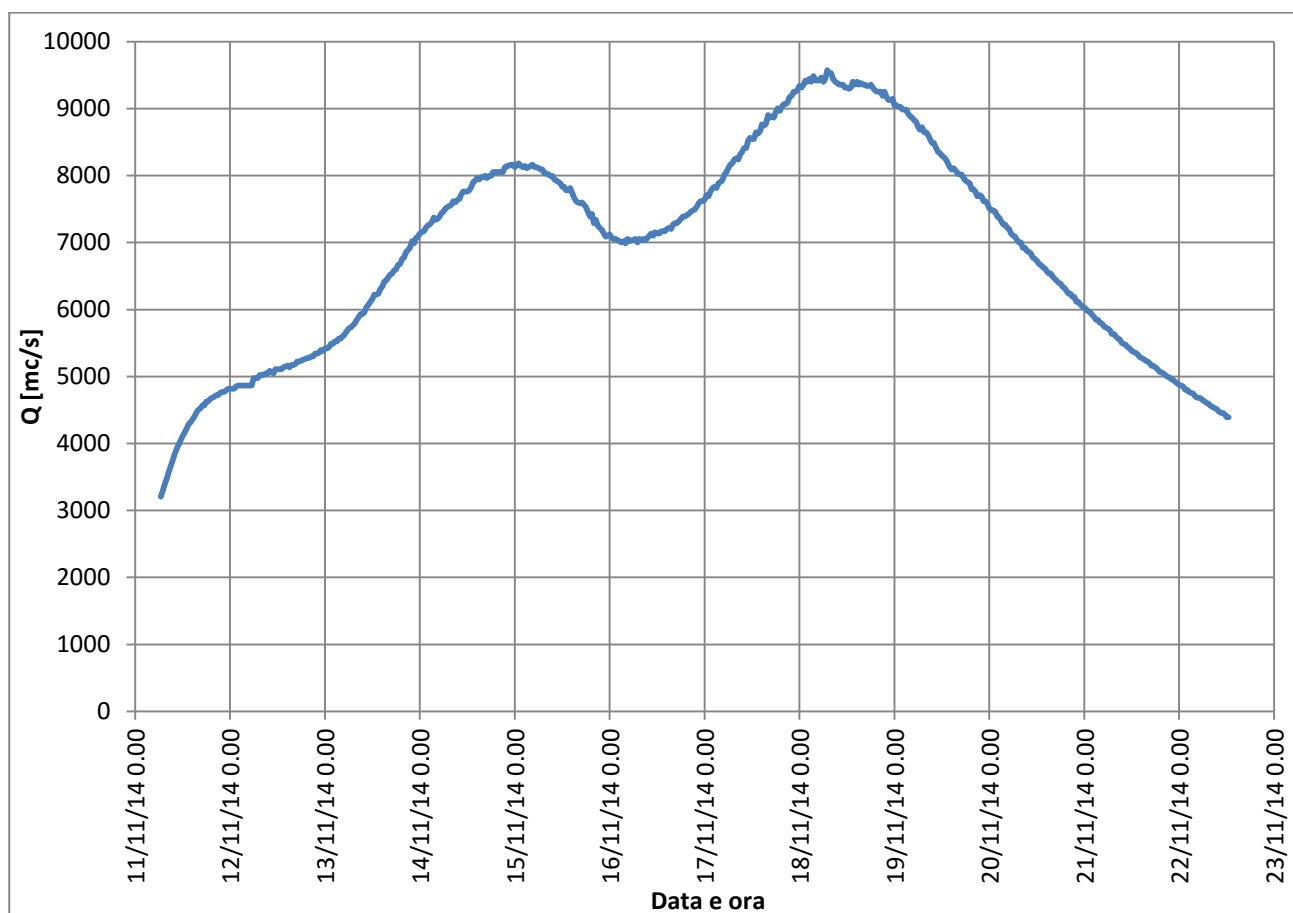


Fig.5.26 Onda in ingresso a Casalmaggiore per l'evento del novembre 2014.

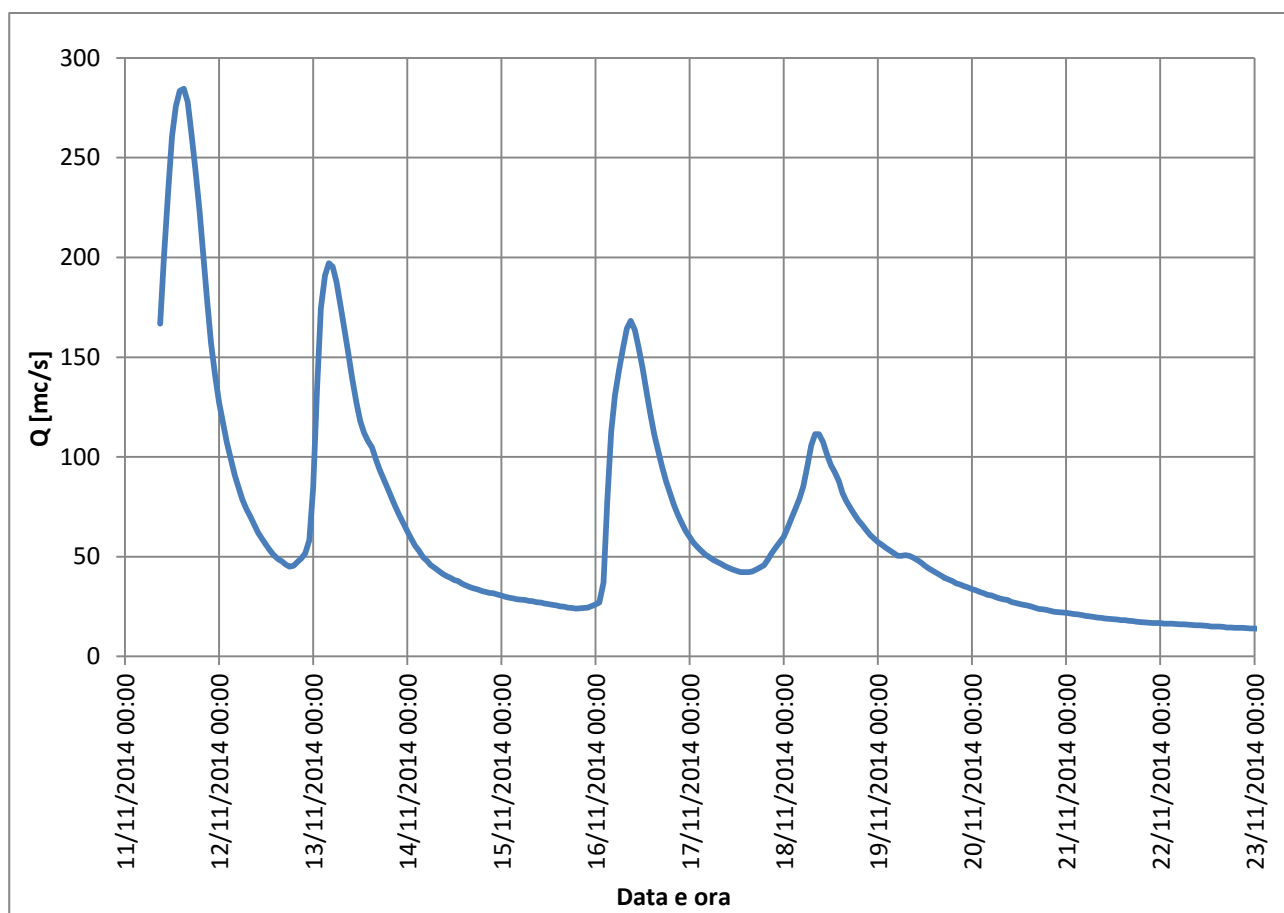


Fig.5.27 Onda in ingresso a Coenzo (torrente Enza) per l'evento del Novembre 2014.

Si è provveduto a decodificare i livelli in corrispondenza di Boretto per il confronto rispetto ai livelli osservati .

In Fig.5.28 si può osservare come nella simulazione l'istante temporale per il quale si verifica il primo colmo è alle ore 03:30 del 15/11/2014, mentre nella realtà è mezz'ora prima, cioè allo ore 03:00 del 15/11/2014; l'istante temporale per il quale si verifica il secondo colmo è alle ore 20:30 del 18/11/202014 sia nella simulazione che nella realtà.

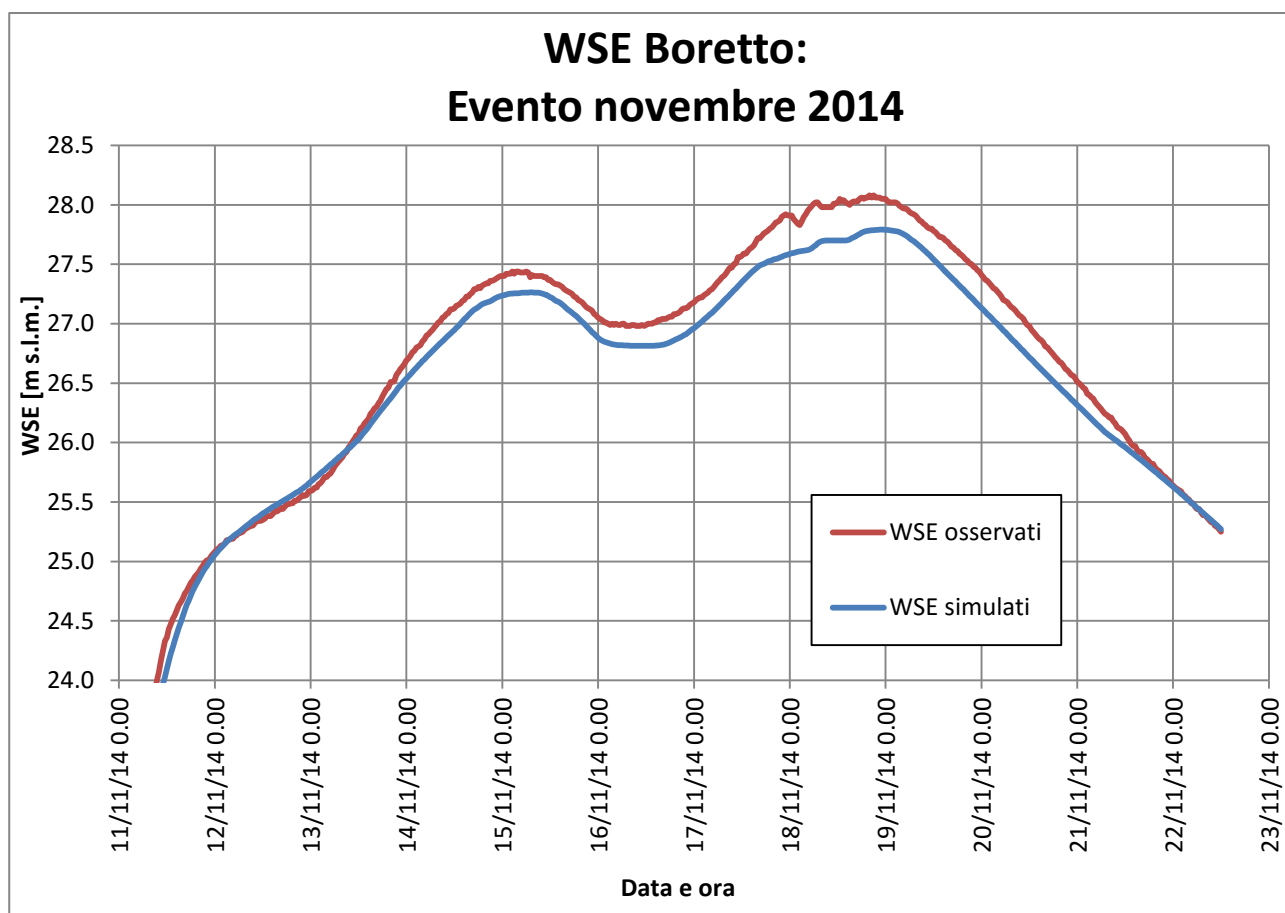


Fig.5.28 Confronto delle quote idriche a Boretto.

Per quanto riguarda invece l'andamento dei livelli si sono ottenuti i seguenti risultati: le quote idriche differiscono tra loro di 18 centimetri in corrispondenza del primo valore del colmo (27.26 m s.l.m. nella simulazione e 27.44 m s.l.m. nella realtà osservata) e di 29 centimetri in corrispondenza del secondo valore del colmo (27.79 m s.l.m. nella simulazione e 28.08 m s.l.m. nella realtà osservata).

Queste ultime differenze sui colmi sono maggiori rispetto a quelle ottenute nelle due precedenti simulazioni ma vengono considerate accettabili in quanto va ricordato che la sezione in corrispondenza di Boretto è particolarmente larga: l'alveo inciso è largo 220 metri e vi sono ben 3000 metri che separano i due argini maestri; 29 centimetri massimi di differenza in termini di quota idrica su 3 chilometri di sezione sono considerati comunque soddisfacenti.

Anche in occasione di questo evento la golenza di Ghiarole non si è invasata. Nella Fig.5.29 è riportato l'involuppo delle quote idriche massime ottenute dalla simulazione nell'evento.

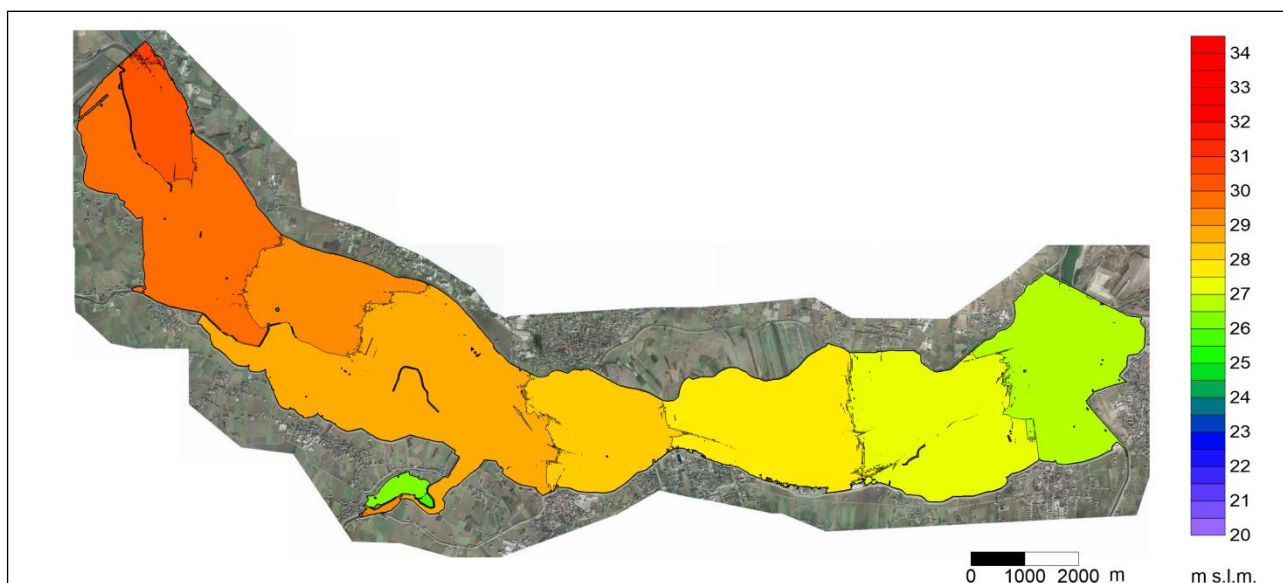


Fig.5.29 Inviluppo delle quote idriche massime ottenute dalla simulazione nell'evento del novembre 2014.

Analogamente ai casi precedenti si è provveduto ad analizzare i livelli in corrispondenza dei punti più depressi dell'argine (vedi Fig.5.30, Fig.5.31, Fig.5.32, Fig.5.33, il punto 5 non viene bagnato). A Scutellara il franco non è mai sceso sotto i 60 centimetri.

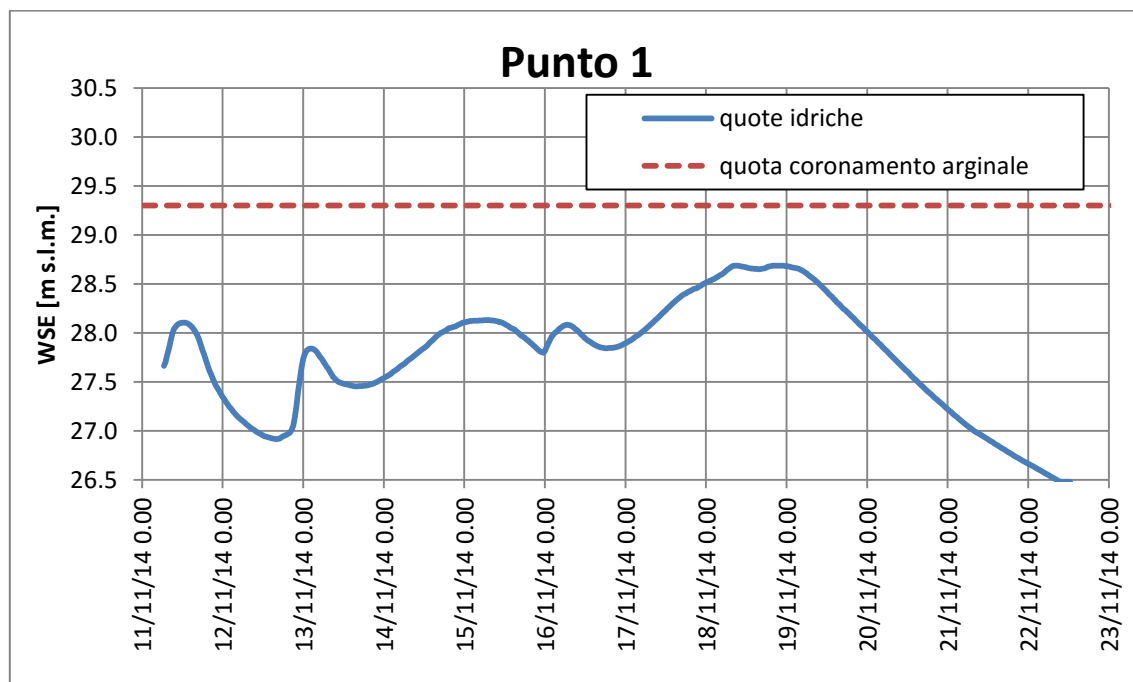


Fig.5.30 Andamento dei livelli per il punto 1.

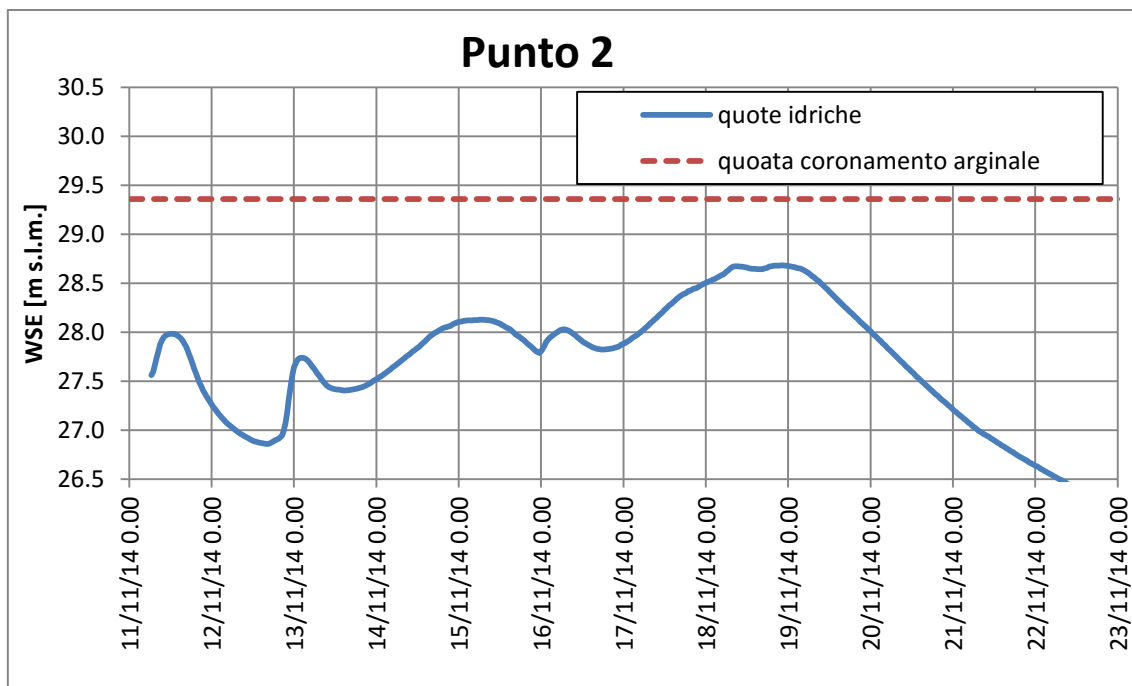


Fig.5.31 Andamento dei livelli per il punto 2.

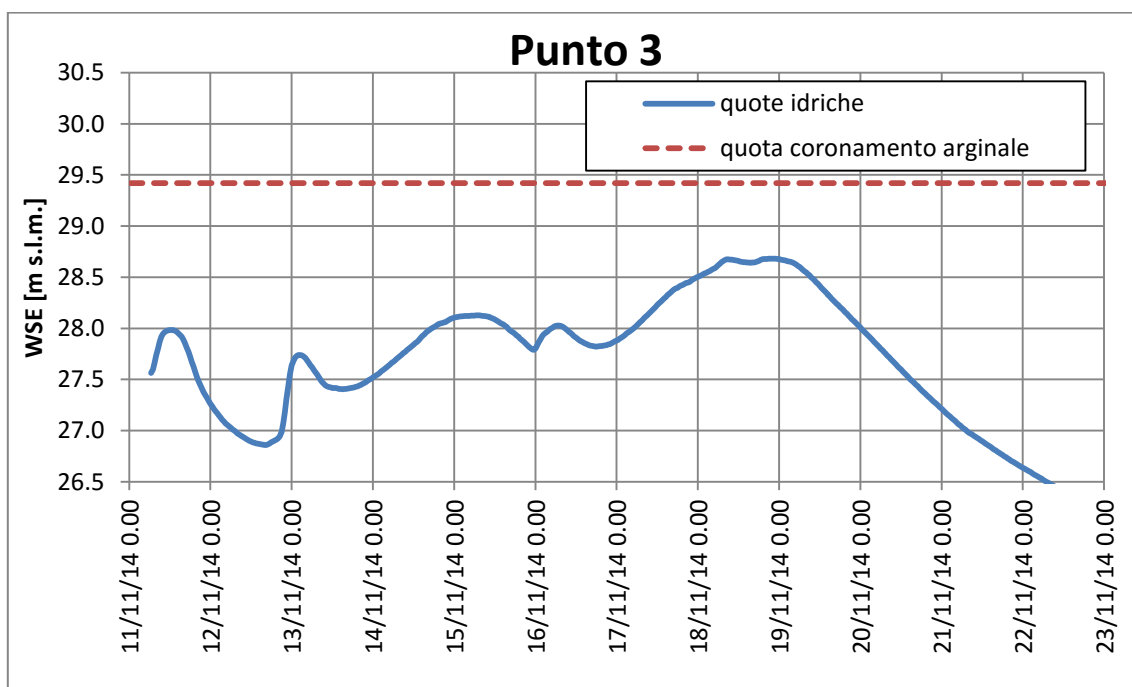


Fig.5.32 Andamento dei livelli per il punto 3.

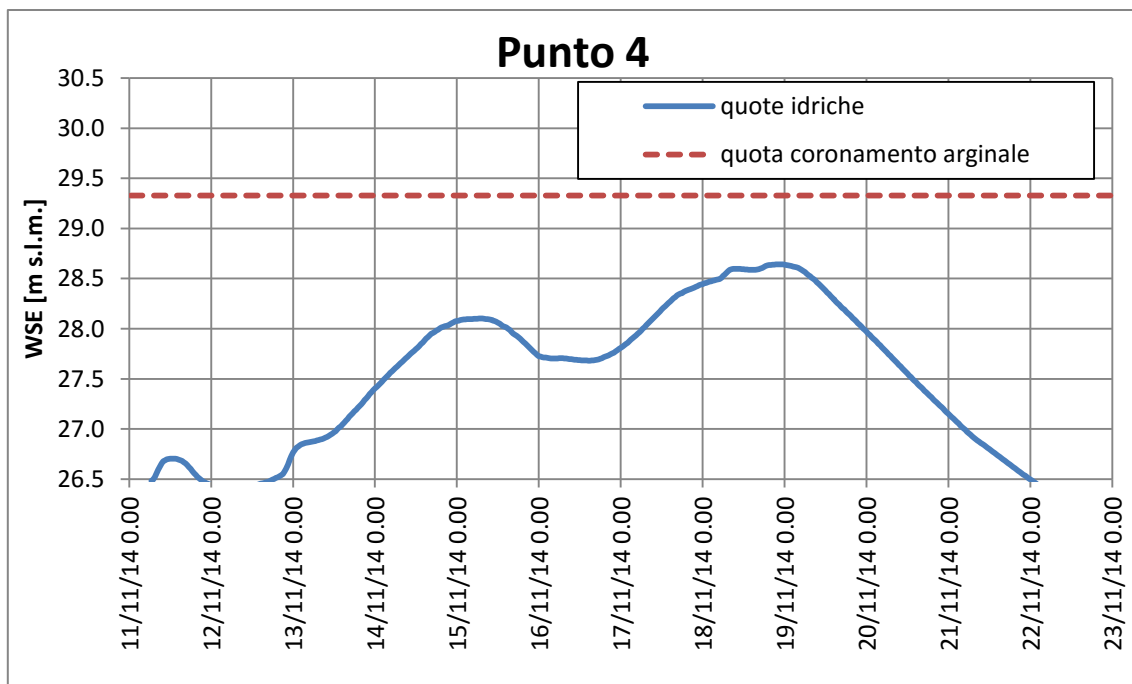


Fig.5.33 Andamento dei livelli per il punto 4.



Foto 5.1 Situazione a Scutellara, 17/11/2014, ore 18:00.



Foto 5.2 Situazione 19/11/2014, ore 15:30.

In *Foto 5.1* e in *Foto 5.2* è possibile osservare come durante questo evento le quote idriche si sono pericolosamente avvicinate alle quote del coronamento arginale, senza tuttavia provocare l'invaso della golena.

In particolare in *Foto 5.1* è rappresentata la zona in corrispondenza del punto depresso 1, mentre in *Foto 5.2* è rappresentata la porzione di argine vicino al punto depresso 3. Nella simulazione si ha un franco di circa 1 metro per entrambe le zone nei giorni e negli orari in cui sono state scattate le foto e questo sembra trovare un buon riscontro, seppur non oggettivo ma puramente visivo, dalle foto stesse.

Con questi buoni risultati si può ritenere conclusa con successo la fase relativa alla validazione del modello.

6 Simulazione di eventi sintetici

Una volta completata la fase di taratura e validazione del modello si è provveduto a simulare tre eventi sintetici che riproducono un'onda di piena con tempo di ritorno rispettivamente pari a 50, 100 e 200 anni, verificando il comportamento della golena ed effettuando un'analisi approfondita sulle modalità di riempimento.

In questo caso si è optato di non considerare l'onda di piena in ingresso dal torrente Enza in quanto non è ben nota la contemporaneità tra gli eventi di piena che avvengono sul Po e sull'Enza. Lo studio di un'eventuale probabilità congiunta di eventi di elevato tempo di ritorno sia sul Po che sull'Enza esula dal presente studio e ad esso sarebbe necessario dedicare un'analisi specifica.

La simulazione di eventi ad elevato tempo di ritorno ha come obiettivo quello di evidenziare le zone dell'argine golenale che per prime provocano l'invaso della golena e individuare le massime quote idriche che si registrano per comprendere al meglio le zone su cui porre maggiore attenzione.

6.1 Eventi con tempo di ritorno di 50, 100 e 200 anni

Gli eventi in esame riproducono in ingresso a Casalmaggiore onde di piena con tempo di ritorno T rispettivamente pari a 50, 100 e 200 anni, con valore al colmo della portata rispettivamente pari a $11493 \text{ m}^3/\text{s}$, $12673 \text{ m}^3/\text{s}$ e a $13848 \text{ m}^3/\text{s}$. Essi sono stati ricavati con la metodologia proposta da Maione et al. (2003).

La durata totale delle simulazioni è pari a 250 ore, vale a dire 10 giorni e 10 ore. Nelle prime 10 ore si è immessa una portata costante pari a $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ per permettere al modello di stabilizzarsi nei confronti delle condizioni iniziali di livello e portata specifica. In *Fig.6.1* si riportano le onde in ingresso a Casalmaggiore. La fase di risalita dura circa 85 ore, quella di esaurimento circa 155 ore. Il colmo a Casalmaggiore si raggiunge dopo 95 ore circa.

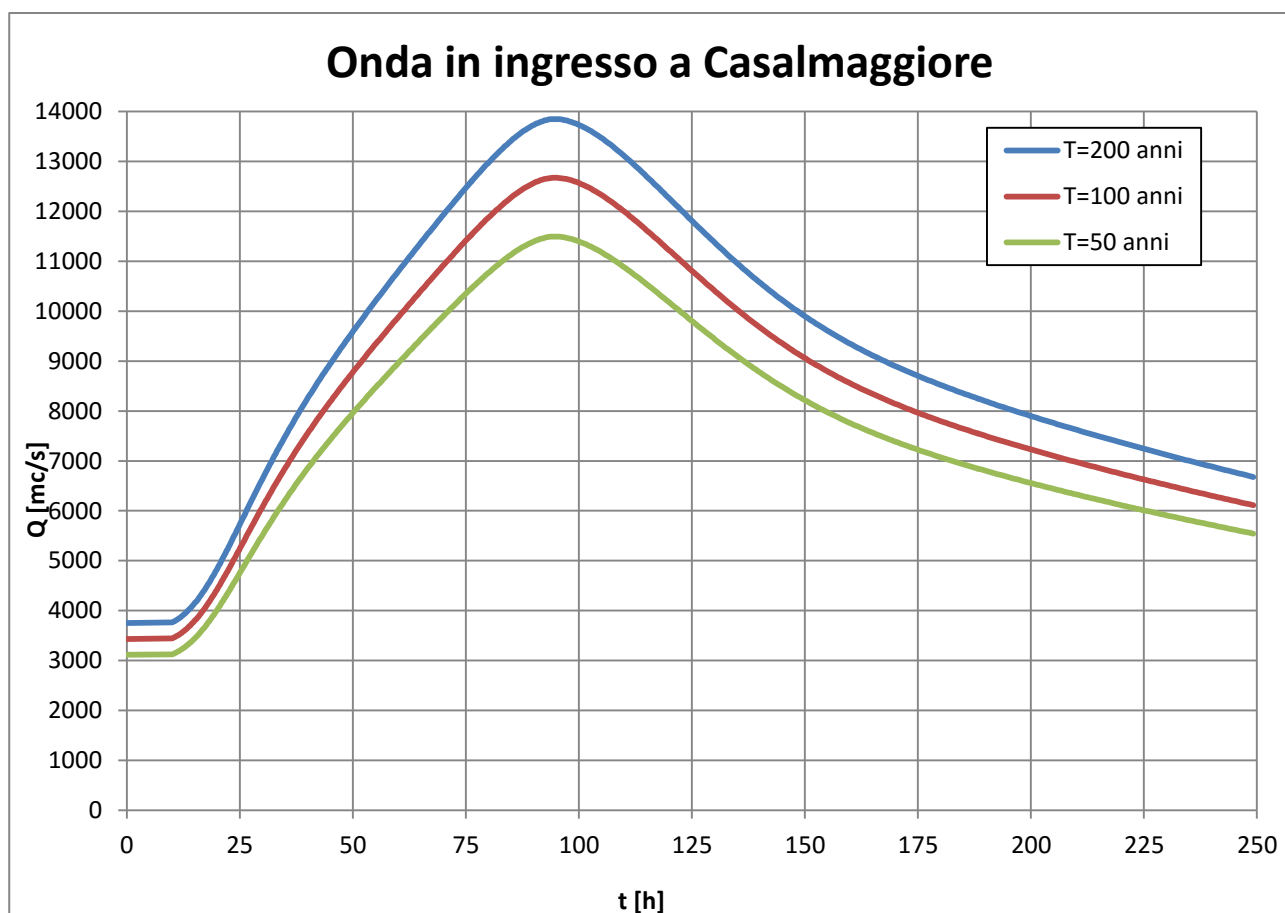


Fig.6.1 Onde in ingresso a Casalmaggiore.

L'onda con $T=50$ anni comporta il sormonto dell'arginatura golenale solamente in corrispondenza delle zone più depresse e per pochi centimetri. L'invaso vero e proprio della golena avviene solo in corrispondenza dei due punti più bassi (corde molli in corrispondenza del punto 1 e del punto 2); il volume invasato è di lieve entità e tutte le altre zone del coronamento arginale contengono l'onda sebbene con franchi modestissimi.

Le onde con $T=100$ anni e $T=200$ anni comportano il sormonto dell'arginatura golenale in più punti. Le 5 zone più depresse vengono sormontate per prime (vedi da Fig.6.2 a Fig.6.6).

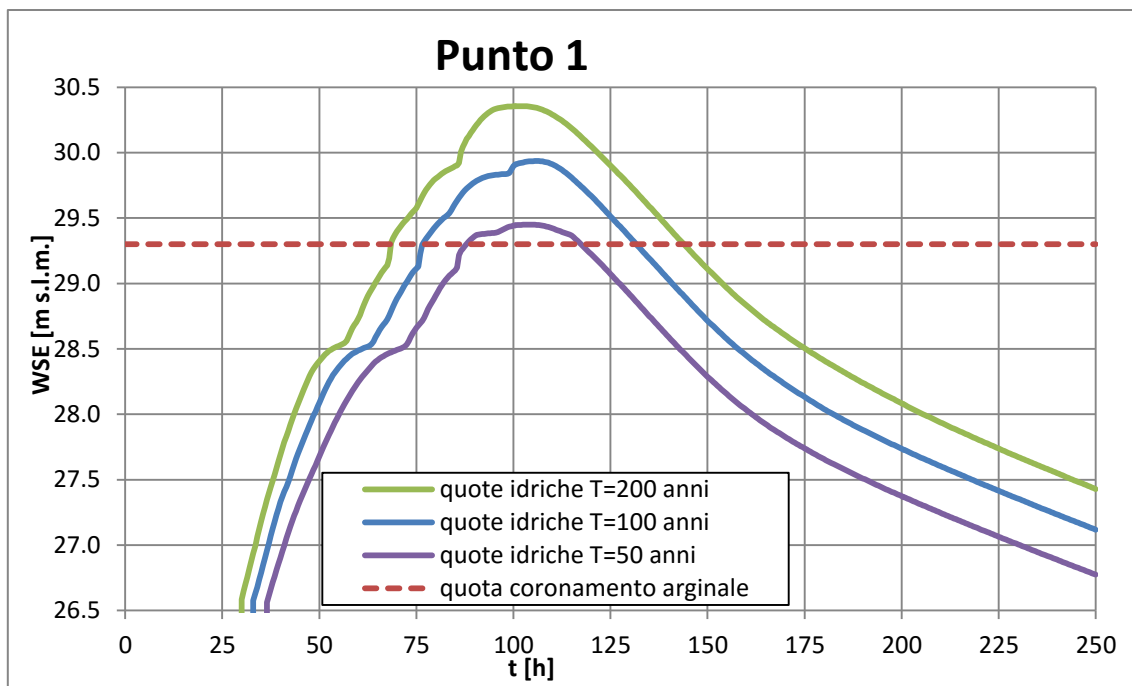


Fig.6.2 Andamento dei livelli per il punto 1.

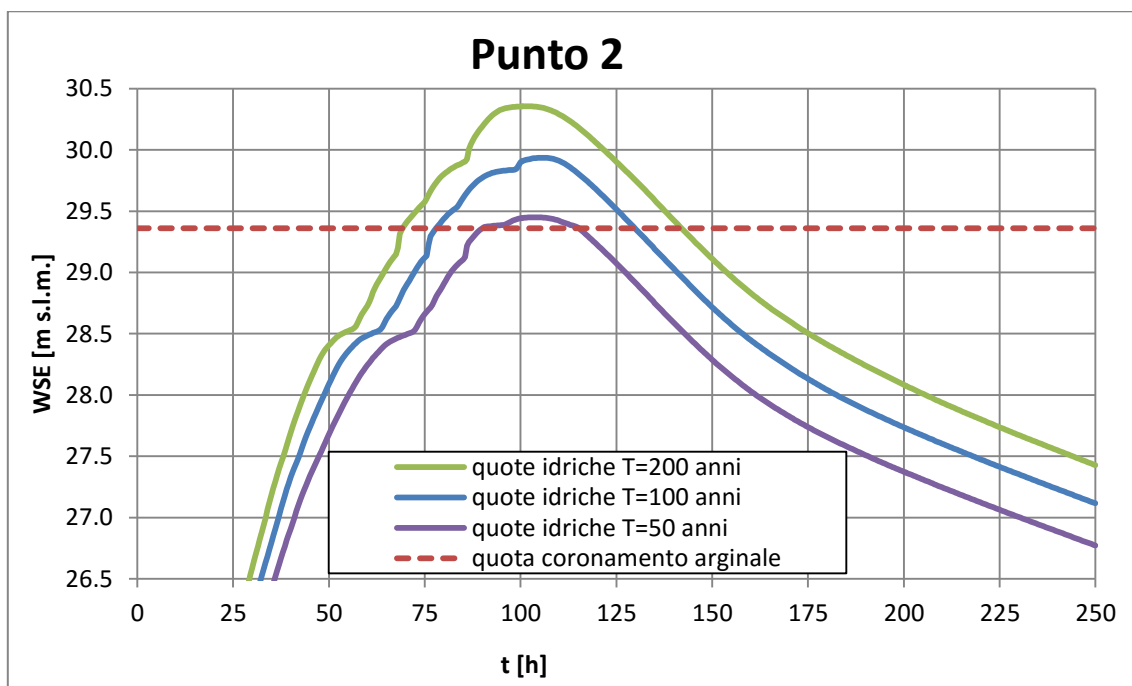


Fig.6.3 Andamento dei livelli per il punto 2.

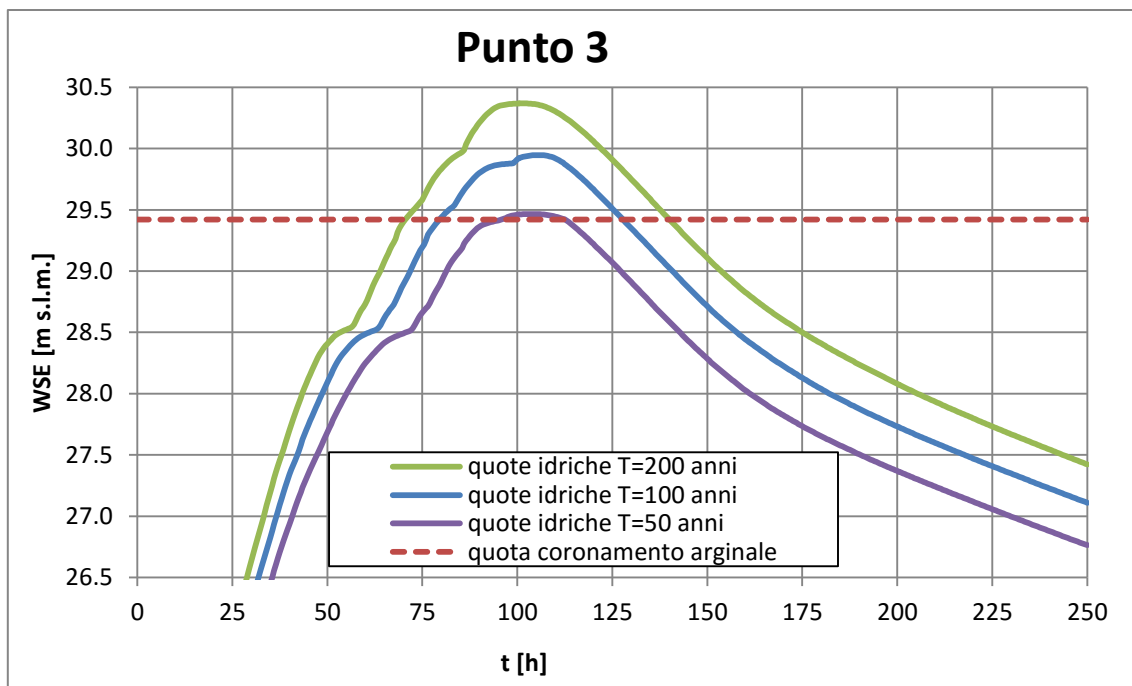


Fig.6.4 Andamento dei livelli per il punto 3.

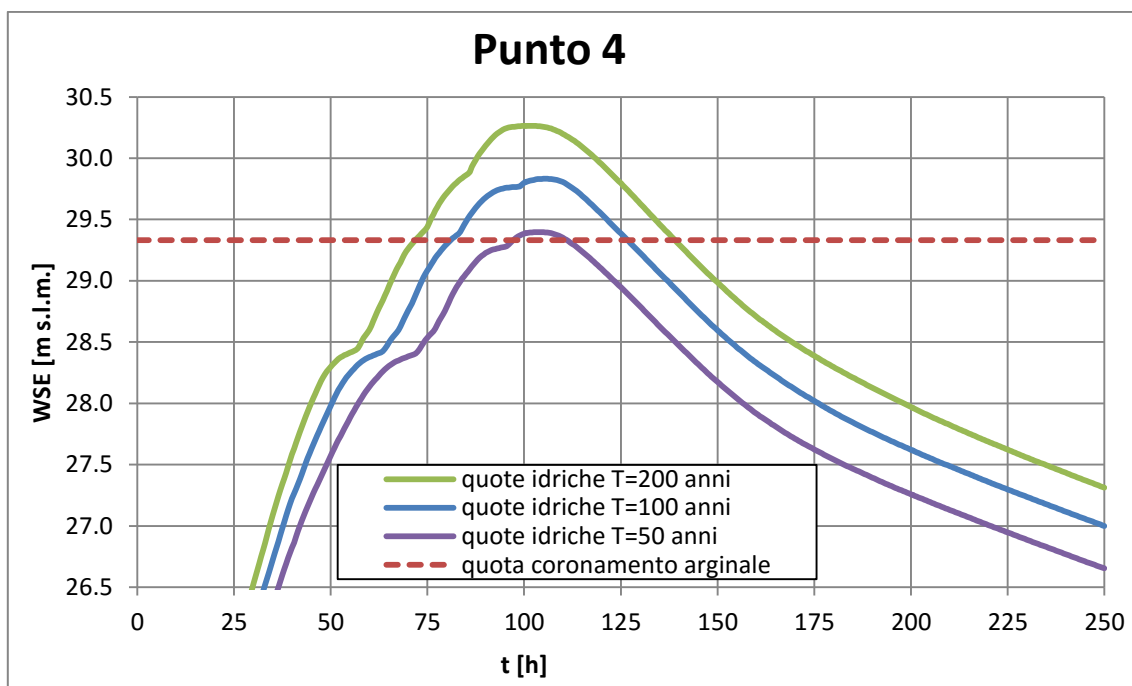


Fig.6.5 Andamento dei livelli per il punto 4.

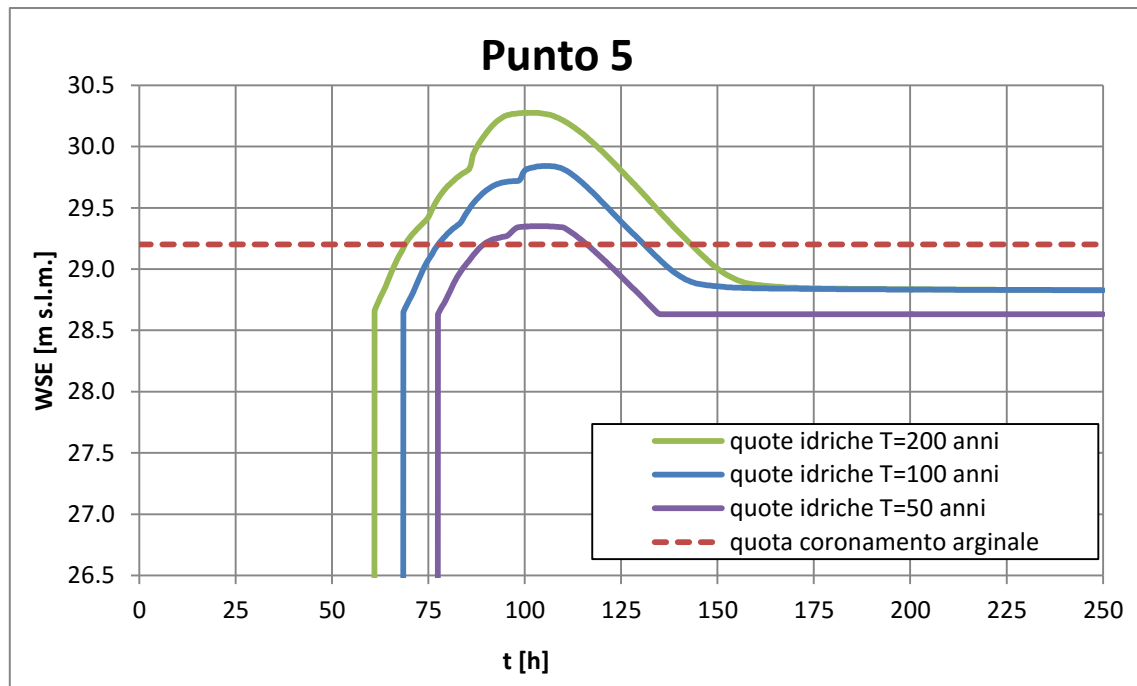


Fig.6.6 Andamento dei livelli per il punto 5.

| Punto | Quota coronamento argine [m s.l.m.] | Quota idrica massima T=50 anni [m s.l.m.] | Tirante max sull'argine T=50 anni [cm] | Quota idrica massima T=100 anni [m s.l.m.] | Tirante max sull'argine T=100 anni [cm] | Quota idrica massima T=200 anni [m s.l.m.] | Tirante max sull'argine T=200 anni [cm] |
|-------|-------------------------------------|---|--|--|---|--|---|
| 1 | 29.30 | 29.45 | 15 | 29.94 | 64 | 30.36 | 106 |
| 2 | 29.36 | 29.45 | 9 | 29.94 | 58 | 30.36 | 100 |
| 3 | 29.42 | 29.47 | 5 | 29.95 | 53 | 30.37 | 95 |
| 4 | 29.33 | 29.40 | 7 | 29.83 | 50 | 30.26 | 93 |
| 5 | 29.20 | 29.35 | 15 | 29.84 | 64 | 30.28 | 108 |

Tab.6.1 Confronto quota punti più depressi-quote idriche massime.

In *Tab.6.1* si può osservare come la quota idrica sormonti le zone più depresse del coronamento arginale fino ad un massimo di 15 cm per l'evento con T=50 anni, 64 cm per l'evento con T=100 anni e di 108 cm per l'evento con T=200 anni. Nel caso di T=50 anni l'invaso della golena è circoscritto alle sole due zone più depresse che si collocano rispettivamente alla progressiva 1200 m e 3800 m circa dello sviluppo arginale. Negli altri due casi l'invaso della golena è totale ed avviene per sormonto del coronamento arginale quasi ovunque.

In *Fig.6.7* è rappresentato l'involuppo delle quote idriche massime risultante dalla simulazione con tempo di ritorno pari a 50 anni: la quota idrica massima raggiunge i 29.52 m s.l.m. a monte e i 29.38 m s.l.m. a valle dell'arginatura golenale. Oltre ai due

punti più depressi che vengono sormontati al massimo di 15 centimetri si registrano alcune zone in cui il livello supera di pochi centimetri la quota arginale ma il velo d'acqua rimane al più sul coronamento durante le ore più critiche senza mai provocare ulteriore invaso in golena.

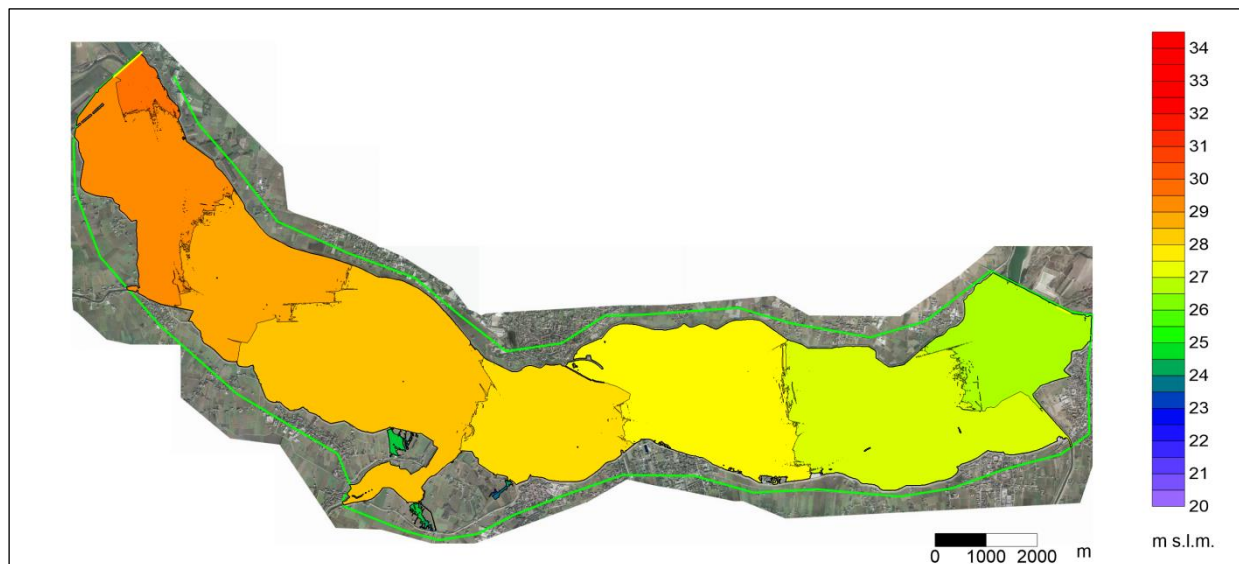


Fig.6.7 Involuppo delle quote idriche massime per la simulazione dell'evento con $T=50$ anni.

In Fig.6.8 è riportata la dinamica di allagamento della golena per l'evento con tempo di ritorno pari a 50 anni. L'allagamento è limitato ai due punti più depressi del coronamento arginale e non interessa altre zone dell'arginatura.

Sono state evidenziate dunque le due zone che presentano maggiore criticità e che verrebbero per prima interessate da un evento di piena del genere.

L'analisi di questo evento fa comprendere quindi che un eventuale rialzo arginale di circa 15 centimetri delle sole zone più depresse comporterebbe la completa messa in sicurezza della golena nei confronti di un evento di piena con tempo di ritorno di 50 anni.

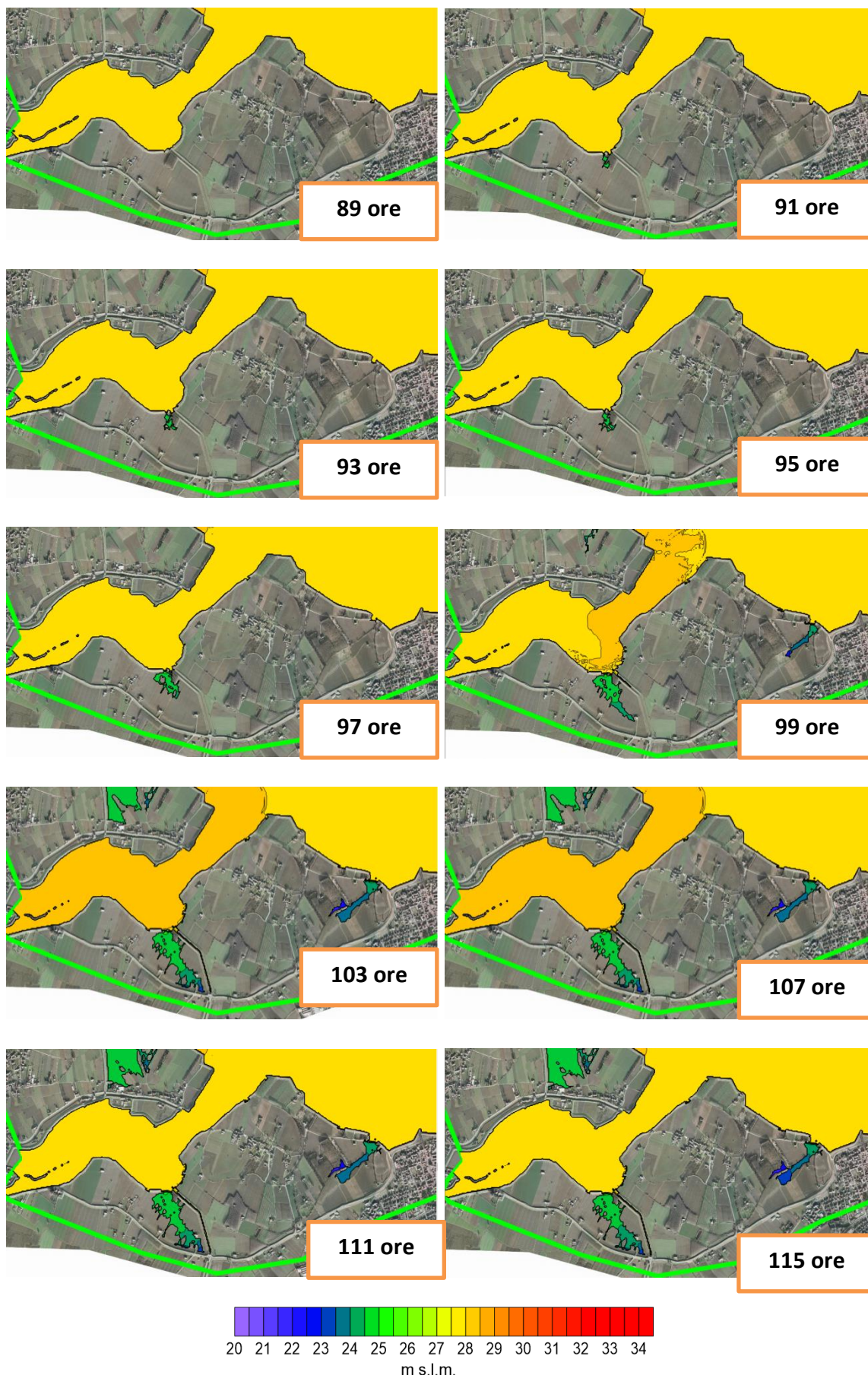


Fig.6.8 Le prime ore di invaso della golena per evento con $T=50$ anni

In Fig.6.9 è rappresentato l'inviluppo delle quote idriche massime risultante dalla simulazione per l'evento con tempo di ritorno centennale: nella golena in esame la quota idrica massima raggiunge i 29.94 m s.l.m. a monte e i 29.87 m s.l.m. a valle dell'arginatura golenale.

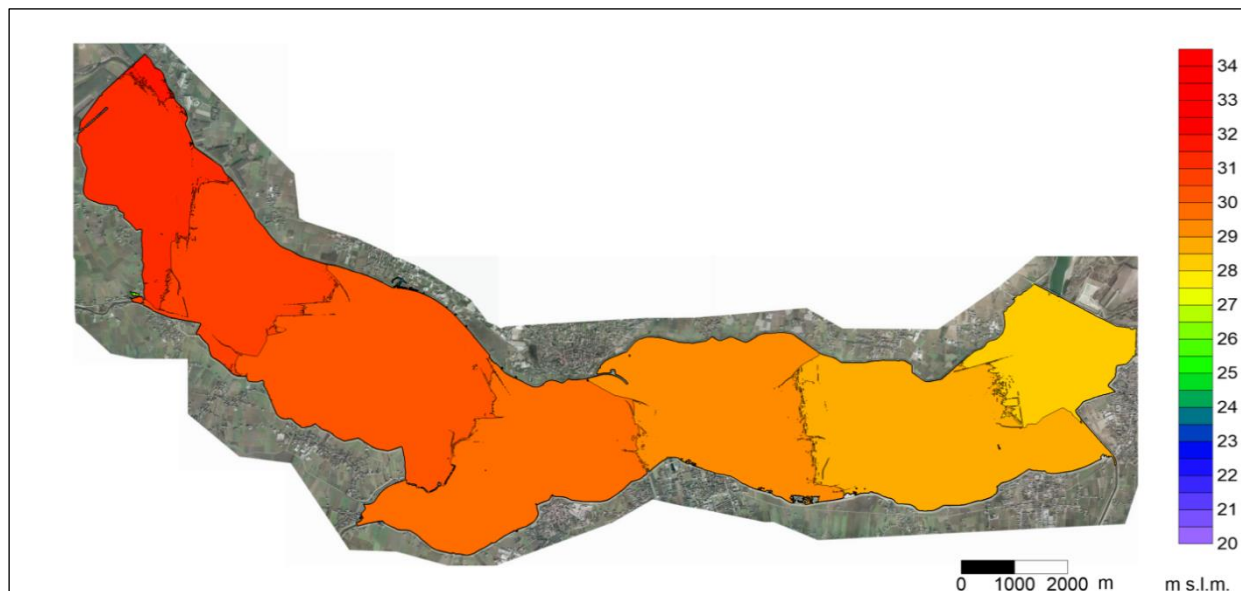


Fig.6.9 Inviluppo delle quote idriche massime per la simulazione dell'evento con $T=100$ anni.

In Fig.6.10 è riportata la dinamica di allagamento della golena per l'evento con tempo di ritorno pari a 100 anni. L'allagamento comincia a svilupparsi a partire dai punti più depressi, per poi estendersi alla quasi totalità dell'argine.

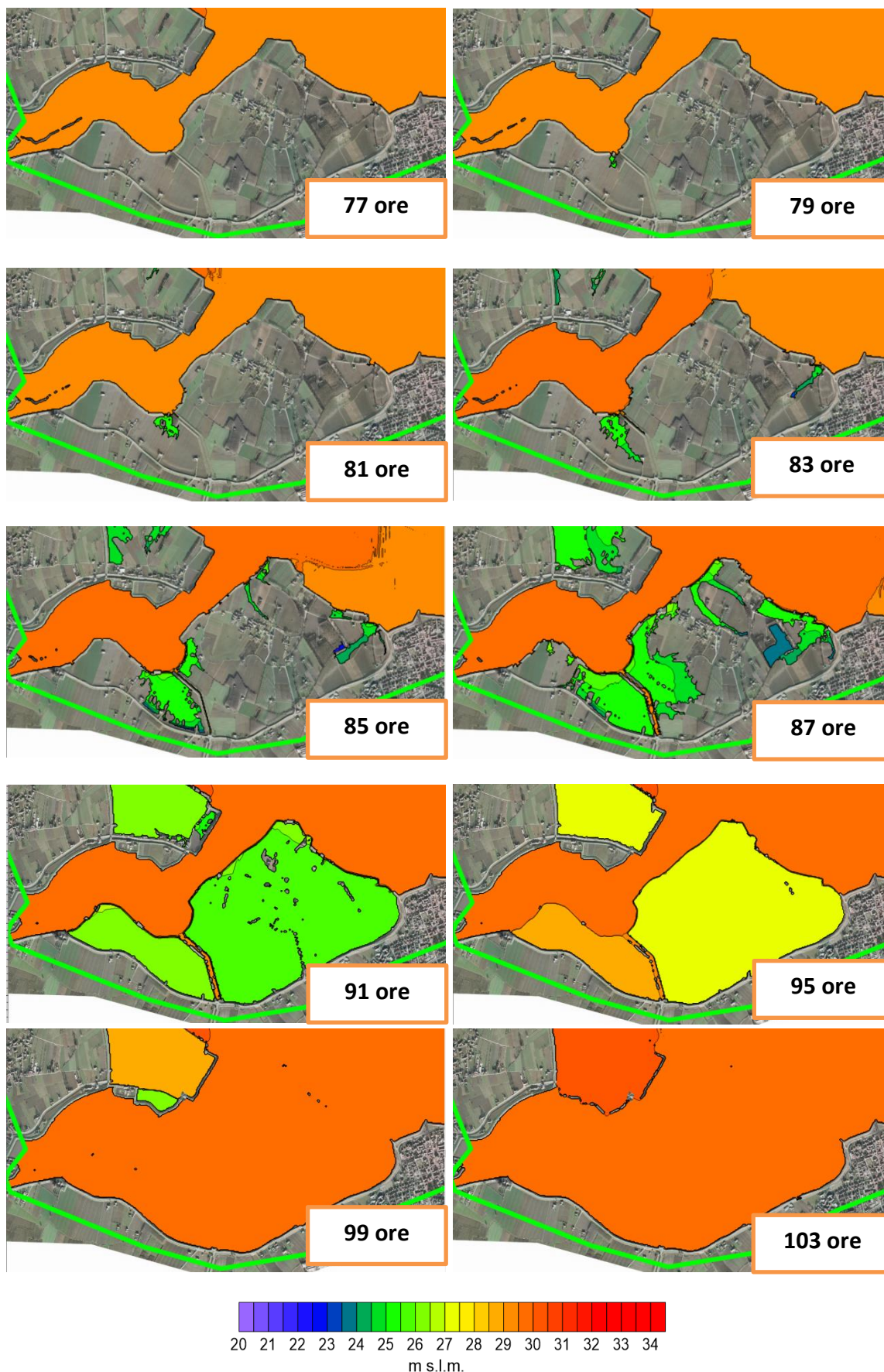


Fig.6.10 Le prime ore di invaso della golena per evento con $T=100$ anni.

In Fig.6.11 è riportata la mappa del modulo delle velocità idriche massime per la simulazione con tempo di ritorno pari a 100 anni per l'intero dominio. In Fig.6.12 è riportato il dettaglio della medesima mappa per la gola in studio. Come era da attendersi, le velocità massime si verificano in corrispondenza del piede dell'argine golenale nelle zone che vengono invase per prime. Il valore massimo per la gola è attorno a 1.56 m/s in corrispondenza della chiavica di Scutellara (punto 1) e attorno a 1.87 m/s nella parte più a valle dell'arginatura (in corrispondenza del punto 5).

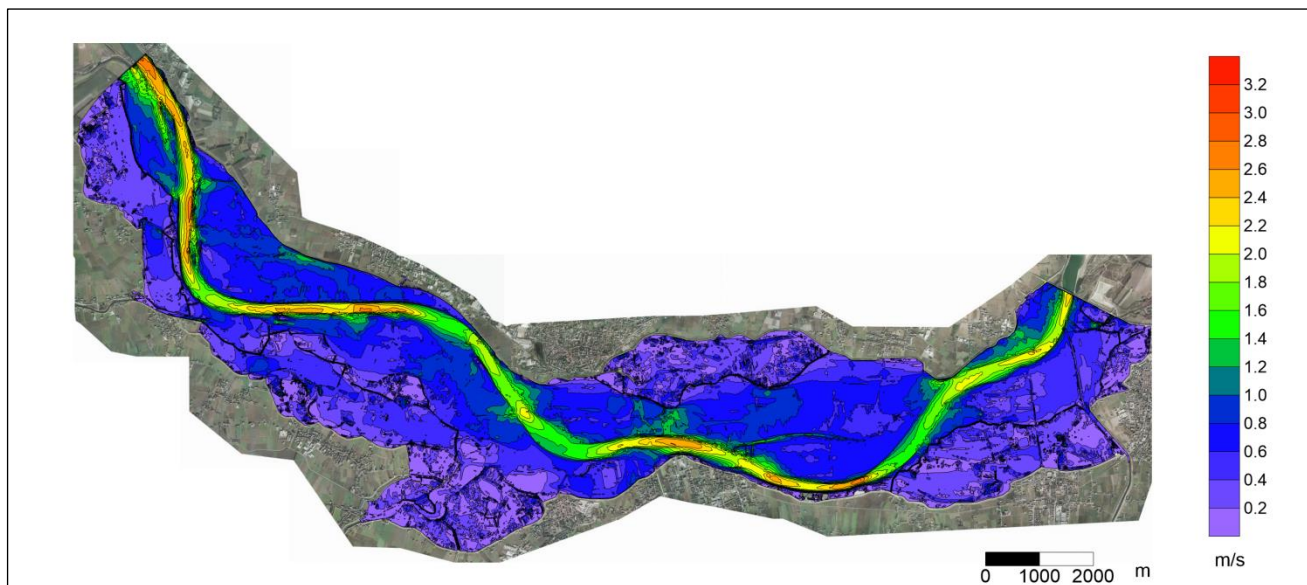


Fig.6.11 Mappa velocità massime per l'intero dominio per $T=100$ anni.

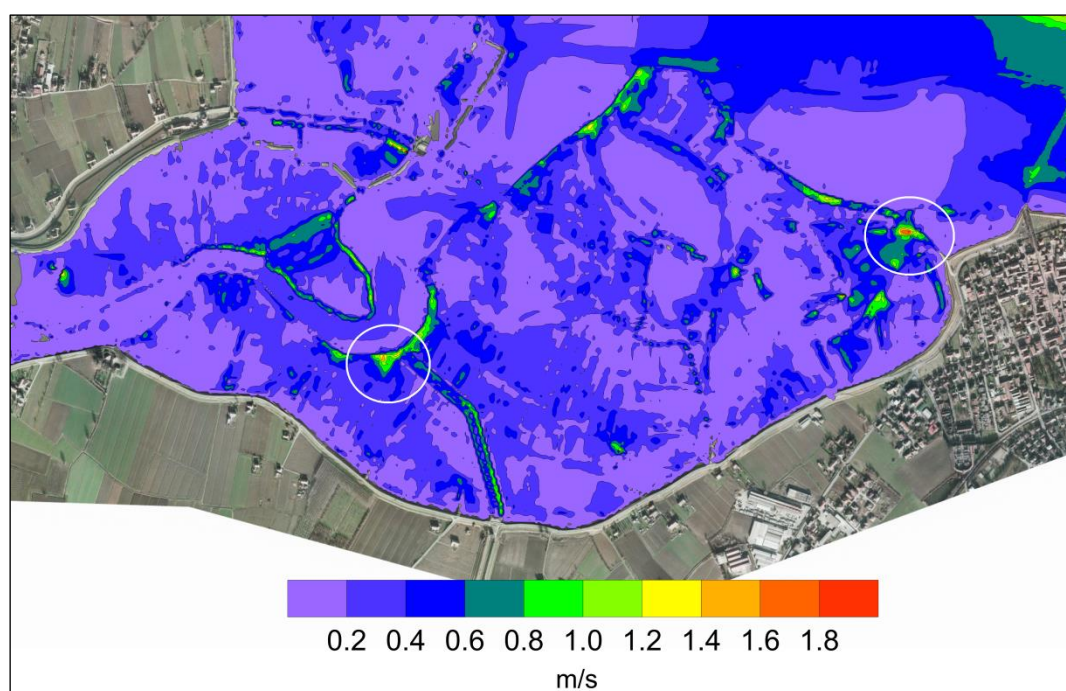


Fig.6.12 Mappa velocità massime per la zona golenale per $T=100$ anni.

L'evento con tempo di ritorno pari a 200 anni risulta essere particolarmente gravoso: le quote idriche massime (vedi *Fig.6.13*) raggiungono i 30.37 m s.l.m. a monte della golenale, comportando il sormonto dell'argine golenale con tiranti superiori al metro nei punti più depressi.

Anche le arginature maestre vengono, in alcuni tratti depressi, sormontate.

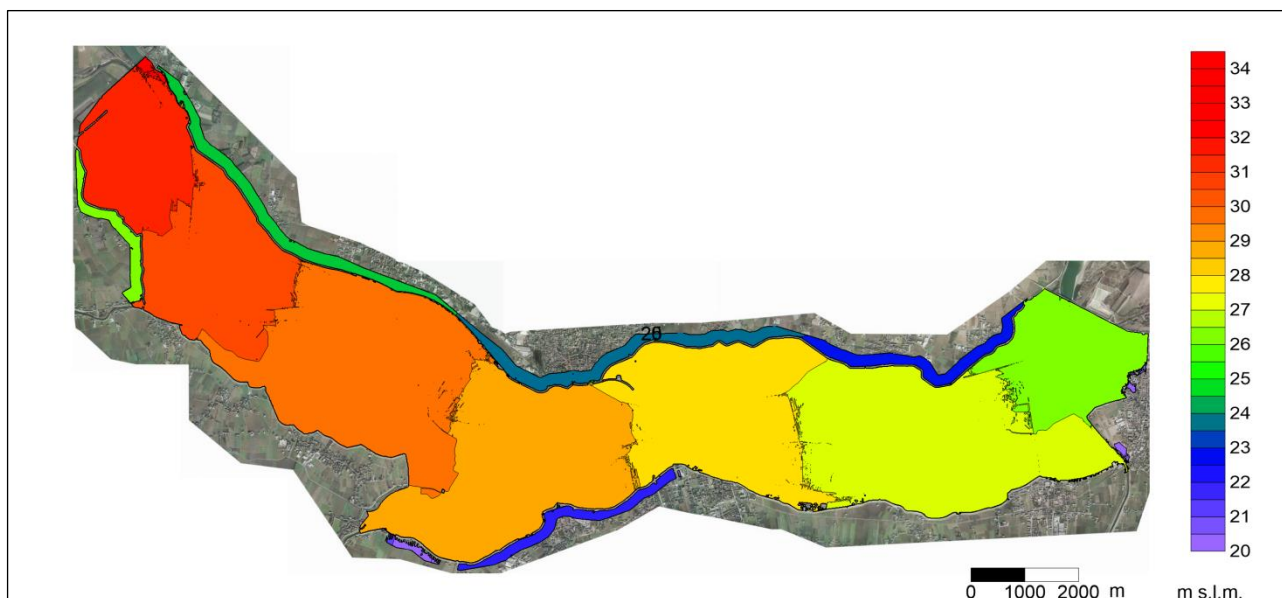


Fig.6.13 Involuppo delle quote idriche massime per la simulazione dell'evento con $T=200$ anni.

Seguendo la nomenclatura del “Rilievo topografico profili arginali evento di piena novembre 2014 del fiume Po” fornito dall'AIPo i tratti degli argini maestri che risultano sormontati sono i seguenti:

- M07-T02-SX, sormontato al massimo di 38 cm;
- M07-T03-SX, sormontato al massimo di 60 cm;
- M08-T01-SX, sormontato al massimo di 91 cm;
- M09-T01-DX, sormontato al massimo di 79 cm.

A titolo di esempio in *Fig.6.14* è riportato il profilo dell'argine maestro nel tratto M09-T01-DX (fonte AIPo), che va dalla frazione di Cantone Svizzero (Brescello) a Boretto. Si evidenziano alcuni tratti, di apprezzabile lunghezza, nei quali il coronamento arginale è più depresso rispetto alla rimanente arginatura. Ivi ha luogo la tracimazione, come si evince dall'andamento delle quote idriche massime ottenute dalla simulazione per $T=200$ anni riportato nella medesima figura (le quote idriche sono state considerate a partire dalla progressiva 3700 metri circa dell'argine maestro dal momento che il tratto precedente non è stato incluso nella batimetria in quanto non importante per lo studio effettuato).

Si nota come nel tratto racchiuso dalla golena di Ghiarole (dalla progressiva 4000 m circa alla progressiva 7500 m circa) il pelo libero è sostanzialmente orizzontale (con valori che variano da 30.36 a 30.32 m s.l.m. in circa 3.5 chilometri); invece, nel tratto successivo, che non presenta golene tra l'alveo inciso e l'argine maestro destro, si apprezza una pendenza più marcata del pelo libero, con le quote idriche che si abbassano fino a 29.74 m s.l.m. in circa 3 chilometri di sviluppo arginale.

Non si esclude che, a seguito di approfondite e accurate verifiche topografiche, le quote di coronamento arginale possano subire modifiche in senso positivo e che pertanto tali esondazioni si riducano o si annullino del tutto.

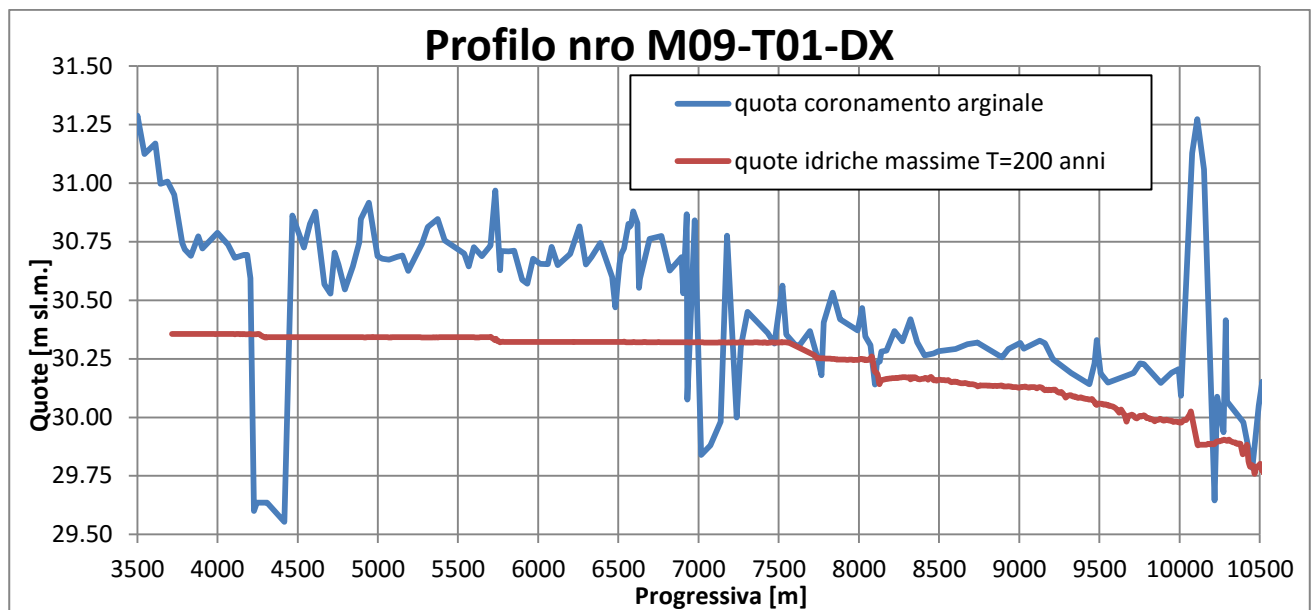


Fig.6.14 Profilo del coronamento dell'argine maestro M09-T01-DX e profilo delle quote idriche massime per $T=200$ anni.

Infine nella Fig.6.15 è riportata la dinamica dell'allagamento della golena per l'evento con tempo di ritorno pari a 200 anni.

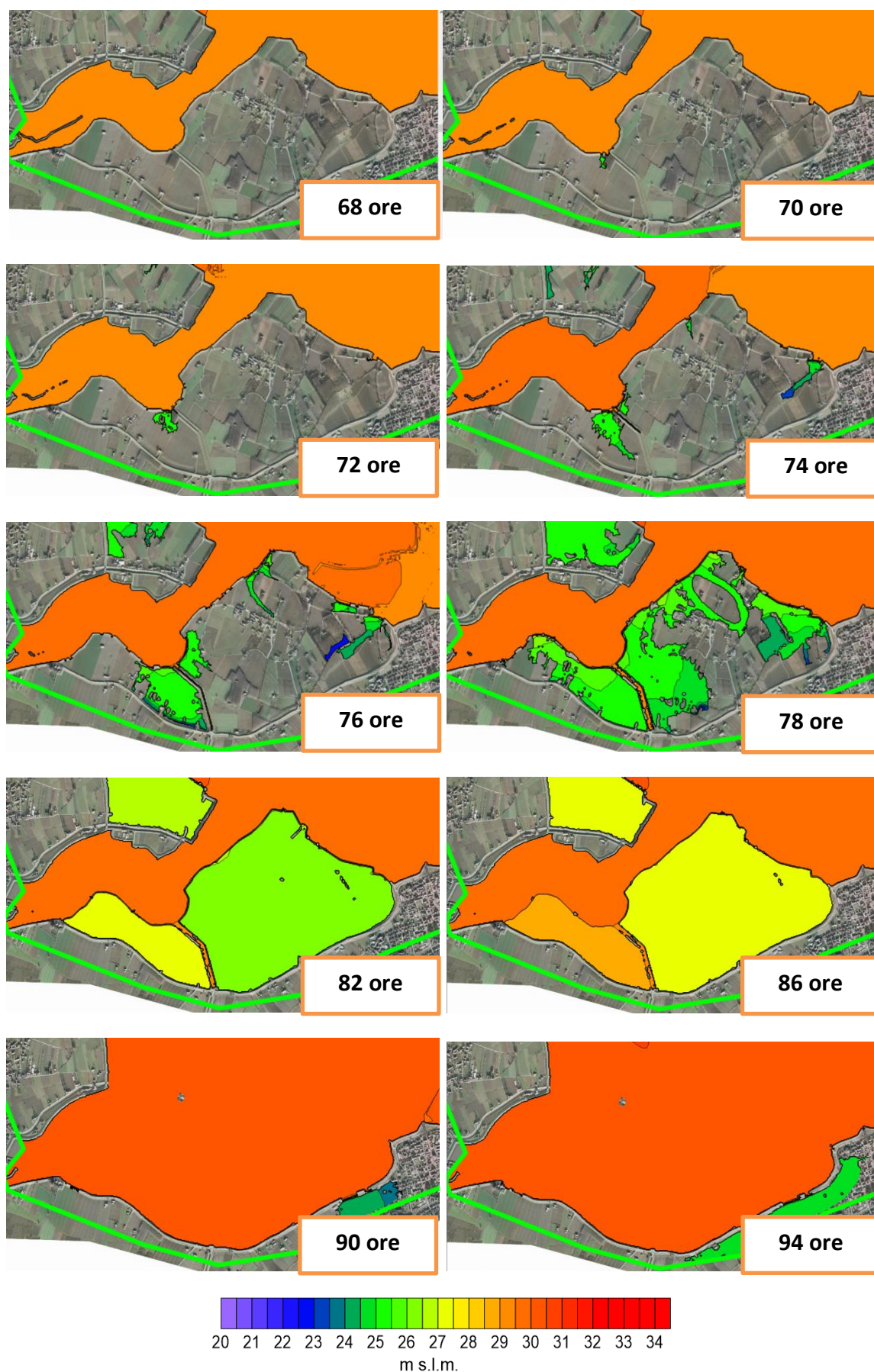


Fig.6.14 Le prime ore di invaso della golena per evento con $T=200$ anni.

7 Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi si è proceduto alla modellazione idrodinamica del tratto di Po prospiciente la golena chiusa di Ghiarole (RE), per poter meglio comprendere il comportamento della golena nei confronti di importanti onde di piena sul fiume Po.

Le elaborazioni sono state effettuate attraverso l'utilizzo di un modello di calcolo bidimensionale multi risoluzione realizzato dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Ambiente, del Territorio e Architettura (Vacondio et al., 2014) dell'Università degli Studi di Parma, basato sulla risoluzione, attraverso il metodo dei volumi finiti, delle equazioni alle acque basse 2D. Tale modello risolve il problema della propagazione di un'onda di piena e richiede, in input, una serie di file riguardanti la batimetria, la scabrezza, le condizioni al contorno e le condizioni iniziali; in output restituisce i valori delle profondità idriche, delle quote idriche e dei vettori velocità in direzione X e Y.

La prima fase del lavoro è stata particolarmente lunga ed articolata ed è stata relativa alla scelta del dominio di calcolo, alla definizione delle condizioni iniziale e al contorno, alla calibrazione della scabrezza e alla realizzazione di un rilievo del coronamento arginale per poter avere a disposizione il corretto ed aggiornato andamento altimetrico all'argine golenale.

Per la calibrazione della scabrezza si sono sfruttati i dati storicamente osservati e le scale delle portate a Boretto.

Successivamente, sfruttando ancora una volta i dati osservati a Boretto, si è provveduto a tarare e validare il modello di calcolo nei confronti di tre diversi eventi di piena registrati sul Po nell'ottobre del 2000, nell'aprile-maggio del 2009 e nel novembre del 2014 per verificare che il modello restituisse un andamento dei livelli idrometrici a Boretto coerente con quanto osservato.

Infine si è proceduto con la simulazione di tre eventi di piena sintetici, ai quali può essere attribuito un tempo di ritorno pari a 50, 100 e 200 anni.

L'evento con tempo di ritorno pari a 50 anni ha comportato il sormonto dell'argine golenale solamente in corrispondenza dei due punti più depressi. Il massimo tirante

sull'argine è di 15 centimetri e l'invaso è di lieve entità. Le rimanenti zone del coronamento arginale hanno adeguatamente protetto la golenia dall'invaso. Questa analisi suggerisce quindi che un eventuale rialzo arginale di circa 15 centimetri delle sole zone più depresse comporterebbe la completa messa in sicurezza della golenia nei confronti di un evento di piena con tempo di ritorno di 50 anni.

L'evento con tempo di ritorno pari a 100 anni ha comportato il sormonto del coronamento arginale dapprima in corrispondenza di 5 zone critiche evidenziate in precedenza che presentano delle quote particolarmente depresse e successivamente in corrispondenza anche di altri punti dello sviluppo arginale, comportando il completo invasamento della golenia.

L'evento con tempo di ritorno pari a 200 anni ha comportato il sormonto del coronamento arginale di più di un metro nei punti più depressi e si è rivelato particolarmente gravoso non solo per la golenia in esame. Anche l'arginatura maestra destra viene, in alcuni tratti particolarmente depressi, sormontata. Questo evidenzia quindi la pericolosità di tale evento (particolarmente gravoso in quanto raggiunge al colmo quasi i $14000 \text{ m}^3/\text{s}$) non solo nei confronti della golenia in esame ma anche della sicurezza idraulica dell'argine maestro. In questo ultimo caso non si esclude che, a seguito di approfondite e accurate verifiche topografiche, le quote di coronamento arginale possano subire modifiche in senso positivo e che pertanto tali esondazioni si riducano o si annullino del tutto.

Bibliografia

- [1] Agenzia Interregionale per il fiume Po, *Rilievo fluviale Po-2005* (geoportale.agenziapo.it/cms/index.php?option=com_aipografd3&view=main), 2005;
- [2] Agenzia Interregionale per il fiume Po, *Rilievo topografico profilo arginale ed evento di piena novembre 2014 del fiume Po*, www.agenziainterregionalepo.it, 2014;
- [3] Agenzia Interregionale per il fiume Po, Ufficio servizio di piena, *Bollettino idrometrico del fiume Po*, www.agenziainterregionalepo.it;
- [4] ARPA Emilia Romagna, *Annali Idrologici 2000, 2009, 2014*, www.arpae.it;
- [5] Blue Marble Geographics, *Global Mapper User's Manual* (http://www.bluemarblegeo.com/knowledgebase/globalmapper/Help_Config.html);
- [6] Camorani G., Filippi F., Cavazzini A., Lombardo G., Pappani G., Forlani G., *Il rilievo altimetrico e batimetrico del Fiume Po nel tratto tra confluenza Ticino e l'incile*, 2006.
- [7] Cremaschi F., *Modellazione idrodinamica di una golena chiusa del fiume Secchia e proposte volte a migliorarne il funzionamento in condizioni di piena*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Parma, 2014;
- [8] Golden Software, *Surfer 12 Full User's Guide* (Users Manual http://downloads.goldensoftware.com/guides/Surfer12_Users_Guide_Preview.pdf);
- [9] Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma, *Linee guida sull'utilizzo del codice di calcolo "SWE"*;
- [10] Hydrologic Engineering Center, *HEC RAS 5.0 Users Manual* (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf>);
- [11] Legge Regionale del 7 novembre 2012, n.11, *Norme per la tutela della fauna ittica e dell'ecosistema acquatico e per la disciplina della pesca, dell'acquacoltura e delle attività connesse nelle acque interne*, <http://demetra.regione.emilia-romagna.it/al/monitor.php?urn=er:assemblealegislativa:legge:2012;11>
- [12] Maione U., Mignosa P. & M. Tomirotti (2003), *Regional estimation of synthetic Design hydrographs*, Int. J. River Basin Management Vol.1, No.2, pp.1-13.
- [13] Prost F., *Modellazione numerica 2D di allagamenti conseguenti a brecce arginali sul fiume Secchia*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Parma, 2014;
- [14] *Regio Decreto del 25 luglio 1904 n. 523*; <http://www.minambiente.it/normative/rd-25-luglio-1904-n-523-testo-unico-delle-disposizioni-di-legge-intorno-alle-opere>
- [15] *Statuto Consorzio di Difesa Terre Golenali del Comune di Brescello*, 2009, www.consorzioghiarole.it;
- [16] Vacondio, R., Dal Palù, A., Mignosa, P., *GPU-enhanced Finite Volume Shallow Water solver for fast flood simulations*, Environmental Modelling & Software (2014), Volume 57, July 2014, Pages 60-75. ISSN:1364-8152.

Ringraziamenti

Ringrazio il relatore di questa tesi il Chiar.mo Prof. Ing. Paolo Mignosa per la disponibilità, per i preziosi consigli e per la quotidiana presenza.

Ringrazio il Prof. Ing. Renato Vacondio e la Prof.ssa Ing. Francesca Aureli per gli esaurienti suggerimenti nel risolvere le varie problematiche incontrate.

Ringrazio l'Ing. Federico Prost per l'aiuto costante e l'Ing. Alessia Ferrari per le spiegazioni nei momenti di necessità.

Ringrazio la Prof.ssa Ing. Maria Giovanna Tanda per avermi fatto conoscere la possibilità di svolgere questa tesi.

Ringrazio il Consorzio Unico di Difesa Terre Golenali del Comune di Brescello nella figura dell'Ing. Davide Graziani per il supporto, per avere fornito le informazioni storiche sul comprensorio di Ghiarole e per il continuo interesse dimostrato.

Ringrazio l'Agenzia Interregionale per il fiume Po per aver fornito i dati fondamentali.

Infine ringrazio mia madre e mio padre per l'amorevole supporto che mi hanno mostrato in ogni momento.