



REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

PRESIDÈNZIA
PRESIDENZA
AUTORITA' DI BACINO REGIONALE DELLA SARDEGNA

Piano di gestione del rischio di alluvioni

secondo ciclo di pianificazione

**I principali eventi alluvionali
recenti in Sardegna**
Vol. 4 di 7

Allegato alla Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 14 del 21/12/2021



**REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDÈNZIA
PRESIDENZA
AUTORITA' DI BACINO REGIONALE DELLA SARDEGNA

Autorità di Bacino della Sardegna

DIREZIONE GENERALE DELL'AGENZIA REGIONALE DEL DISTRETTO IDROGRAFICO DELLA SARDEGNA

Direttore Generale: Antonio Sanna

Direttore del Servizio difesa del suolo, assetto idrogeologico e gestione del rischio alluvioni: Marco Melis

Coordinamento tecnico-amministrativo: Gianluigi Mancosu

Coordinamento operativo: Luisa Manigas

Elaborazioni GIS: Gian Luca Marras

Gruppo di lavoro: Giuseppe Canè, Piercarlo Ciabatti, Nicoletta Contis, Andrea Lazzari, Giovanni Luise, Maria Antonietta Murru Perra, Michela Olivari, Alessandra Pillai, Corrado Sechi, Riccardo Todde

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CAGLIARI – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura

Responsabile Scientifico: Giovanni Maria Sechi

Elaborazioni GIS: Giovanni Cocco

Gruppo di lavoro: Alessio Cera, Clorinda Cortis, Pino Frau, Saverio Liberatore, Mauro Piras, Emanuela Sassu

Con il contributo, per le parti di competenza, di:

DIREZIONE GENERALE DELLA PROTEZIONE CIVILE

Direttore Generale: Antonio Pasquale Belloi

Direttore del Servizio pianificazione e gestione delle emergenze: Mauro Merella

Direttore del Servizio previsione rischi e dei sistemi informativi, infrastrutture e reti: Federico Ferrarese Ceruti

Gruppo di lavoro: Salvatore Cinus, Daniela Pani, Fabrizia Soi, Antonio Usai.

DIREZIONE GENERALE DEI LAVORI PUBBLICI

Direttore Generale: Piero Dau

Direttore del Servizio opere idriche e idrogeologiche: Costantino Azzena

Gruppo di lavoro: Roberta Daino, Alberto Spano

Il presente documento costituisce un elaborato del Piano di gestione del rischio di alluvioni (PGRA) della Sardegna aggiornato per il Secondo ciclo di pianificazione. Come meglio illustrato nella premessa, il presente elaborato integra e aggiorna i contenuti del corrispondente elaborato facente parte della prima stesura del PGRA, che è stata oggetto di approvazione con Deliberazione del Comitato Istituzionale dell'Autorità di bacino regionale della Sardegna n. 2 del 15/3/2016 e con DPCM del 27 ottobre 2016 (GURI n. 30 del 6 febbraio 2017).

Per tutti gli approfondimenti: www.regione.sardegna.it/pianogestionerischioalluvioni

COMUNE DI OLBIA



STUDIO DI VARIANTE AL PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (PAI) E DEL QUADRO DELLE OPERE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO NEL TERRITORIO COMUNALE DI OLBIA

Elaborato: A02	RICOSTRUZIONE EVENTO ALLUVIONALE DEL 18-19/11/2013
Scala:	

COORDINATORE:
Prof. Marco Mancini



CONSULENTE ESPERTO:
Geol. Phd Giovanni Tilocca

IL SINDACO:
On. Enrico Giovanni Maria Giovannelli

L'ASSESSORE ALL'URBANISTICA
Avv. Carlo Careddu

IL DIRIGENTE
Ing. Costantino Azzena

Delibera di adozione n. _____ del _____
Delibera di approvazione n. _____ del _____

SETTEMBRE 2014

Sommario

1	I BACINI IDROGRAFICI.....	3
1.1	IL RETICOLO IDROGRAFICO.....	4
1.2	BACINI AFFERENTI AL RETICOLO IDROGRAFICO	5
2	L'EVENTO ALLUVIONALE DEL 18 NOVEMBRE 2013.....	6
2.1	DATI PLUVIOMETRICI.....	8
2.1.1	<i>Evento Pluviometrico del 18 novembre 2013: Caratterizzazione in frequenza.....</i>	<i>10</i>
2.2	AREE ALLAGATE CENSITE NELL'EVENTO.....	11
3	MODELLAZIONE IDROLOGICA DELL'EVENTO	12
3.1	IL MODELLO DISTRIBUITO DELLA TRASFORMAZIONE AFFLUSSI DEFLUSSI.....	12
3.2	DATI UTILIZZATI.....	13
3.3	BACINI IDROGRAFICI.....	14
3.4	PARAMETRI DI ASSORBIMENTO	15
3.5	PARAMETRI DI PROPAGAZIONE IDRAULICA	19
3.6	RICOSTRUZIONE DEGLI IDROGRAMMI DELL'EVENTO ALLUVIONALE	24
3.6.1	<i>Caratterizzazione in frequenza delle portate dell'evento del 18 novembre 2013.....</i>	<i>25</i>
4	MODELLAZIONE IDRAULICA DELL'EVENTO DI INONDAZIONE.....	27
4.1	IL MODELLO IDRAULICO DI PROPAGAZIONE.....	27
4.2	DATI UTILIZZATI.....	29
5	IL MODELLO DI PROPAGAZIONE IDRAULICA 1D-2D.....	30
5.1	LA PROPAGAZIONE MONODIMENSIONALE (1D).....	30
5.2	LE STRUTTURE INTERFERENTI CON LA PROPAGAZIONE 1D	31
5.3	CARATTERIZZAZIONE DELLA SCABREZZA 1D.....	31
5.4	LA PROPAGAZIONE BIDIMENSIONALE (2D).....	32
5.4.1	<i>Caratterizzazione della scabrezza della piana alluvionale (2D).....</i>	<i>34</i>
5.5	CONDIZIONI AL CONTORNO	35
5.5.1	<i>Condizioni al contorno di monte.....</i>	<i>35</i>
5.5.2	<i>Condizione al contorno di valle.....</i>	<i>36</i>
5.6	SIMULAZIONE DELL'EVENTO IDRAULICA IBRIDA 1D + 2D	37
6	IL MODELLO IDRAULICO PURAMENTE BIDIMENSIONALE 2D.....	41
6.1	GEOMETRIA DEL MODELLO.....	42
6.2	CARATTERIZZAZIONE DELLE SCABREZZE.....	43

6.3	CONDIZIONI AL CONTORNO DI MONTE.....	44
6.4	CONDIZIONE DI VALLE.....	46
6.5	RICOSTRUZIONE IDRAULICA BIDIMENSIONALE DELL'EVENTO	46
6.6	ANALISI DI SENSITIVITÀ SULLA POROSITÀ DEGLI EDIFICI.....	50

1 I BACINI IDROGRAFICI

I bacini idrografici in analisi sono quelli sottesi alle sezioni terminali, corrispondenti con la foce a mare, del reticolo di drenaggio del centro urbano della città di Olbia. Alcuni di questi canali originariamente avevano la funzione di bonifica della piana dove oggi si estende l'area urbanizzata. Con l'evolversi dello sviluppo urbano tale reticolo di bonifica ha assunto, di fatto, la funzione di reticolo di drenaggio delle aree a monte del centro abitato e delle aree urbane stesse. Le aree esterne al centro urbano, indicativamente confinato all'interno della cintura della tangenziale ovest, presentano insediamenti urbani sparsi e sono prevalentemente caratterizzati da una copertura del suolo di tipo agricolo-naturale. Le aree interne alla cintura della tangenziale costituiscono invece un'area densamente urbanizzata e continua con caratteristiche di copertura del suolo di tipo impermeabile. Di seguito si riporta un confronto tra l'ortofoto dell'anno 1954 e l'ortofoto degli anni 2000 dove emerge il forte sviluppo urbanistico del centro abitato di Olbia avvenuto negli ultimi cinquant'anni.

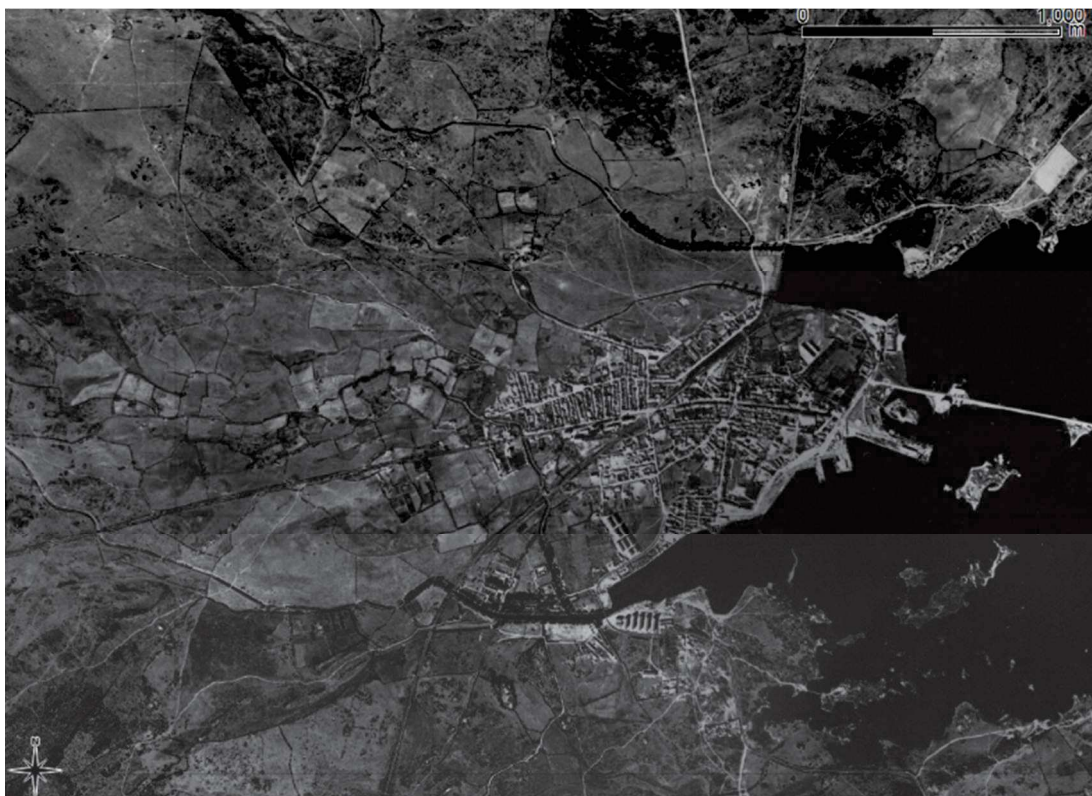


Figura 1. Ortofoto 1954. Il reticolo presente ha prevalentemente funzione di bonifica della piana di Olbia.

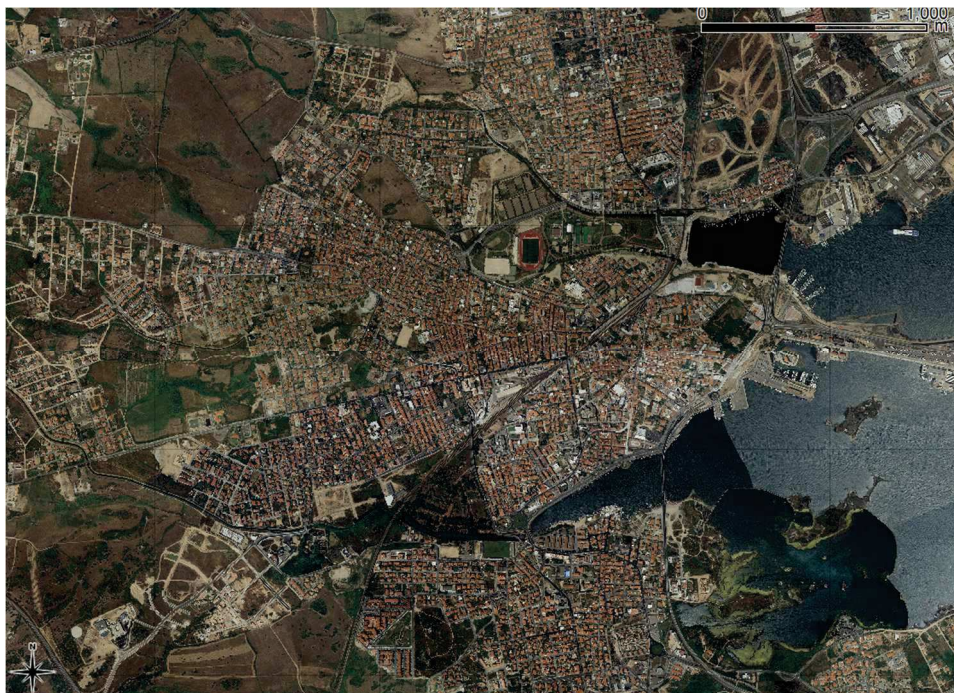


Figura 2. Ortofoto anni 2000. Il reticolo ha acquisito la funzione prevalente di reticolo di drenaggio.

1.1 IL RETICOLO IDROGRAFICO

Il reticolo idrografico dell'area urbana del comune di Olbia è costituito, da sud procedendo verso nord, dalle aste principali e dai rispettivi rii minori affluenti dei seguenti corsi d'acqua:

- Riu Paule Longa (nero);
- Riu Seligheddu (arancio);
- Riu Gadduresu (giallo);
- Canale Zozò (verde);
- Riu San Nicola (magenta);
- Riu Tilibas (rosso);

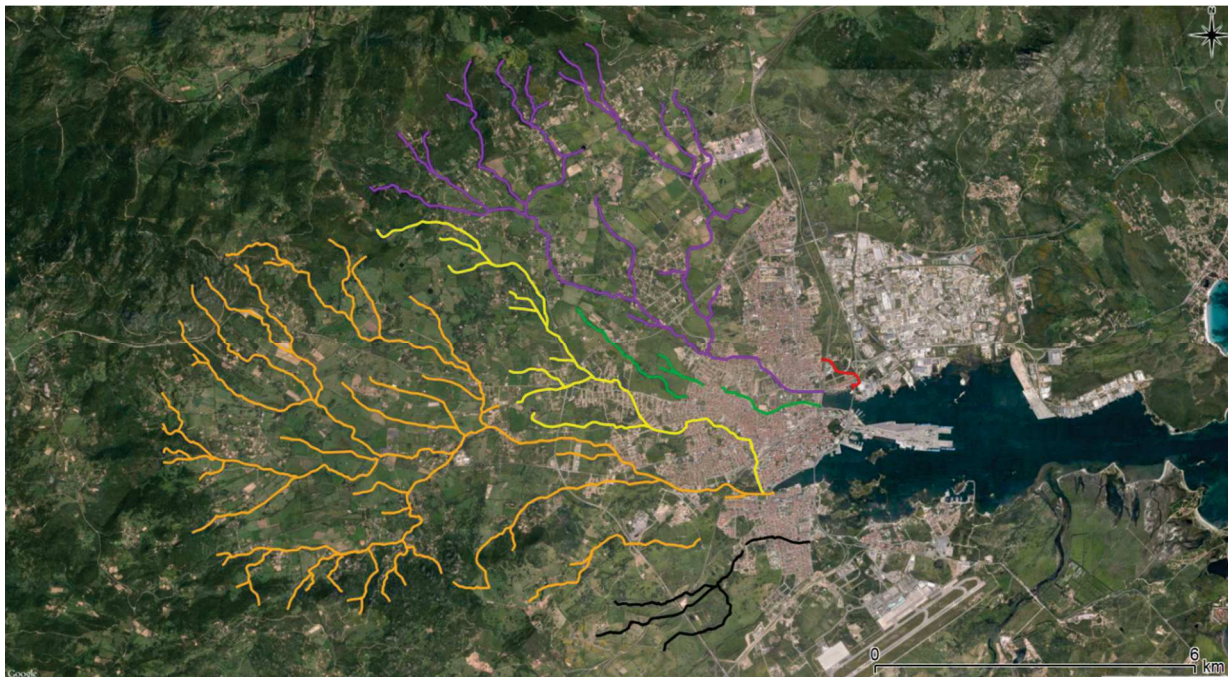


Figura 3. Reticolo idrografico dell'area urbana del comune di Olbia.

1.2 BACINI AFFERENTI AL RETICOLO IDROGRAFICO

Sulla base del reticolo idrografico ottenuto dalla Carta dell'uso del suolo integrata con la cartografia comunale di settore ed utilizzando come base topografica il modello digitale del terreno (DTM con risoluzione spaziale a celle di 10m x 10m), sono stati definiti i bacini idrografici afferenti alle singole strutture del reticolo di drenaggio. La determinazione dei bacini e delle caratteristiche morfologiche degli stessi è stata effettuata tramite l'utilizzo di specifico software GIS che permettono l'elaborazione e manipolazione dei dati geometrici georeferenziati.

In particolare sono stati individuati, da sud verso nord, i seguenti bacini idrografici:

- AU_B1, afferente al reticolo idrografico del Riu Paule Longa;
- AU_B2, afferente al reticolo idrografico del Riu Seligheddu;
- AU_B3, afferente al reticolo idrografico del Riu Gadduresu;
- AU_B4, afferente al reticolo idrografico del Canale Zozò;
- AU_B5, afferente al reticolo idrografico del Riu San Nicola;
- AU_B6, afferente al reticolo idrografico del Riu Tilibas;

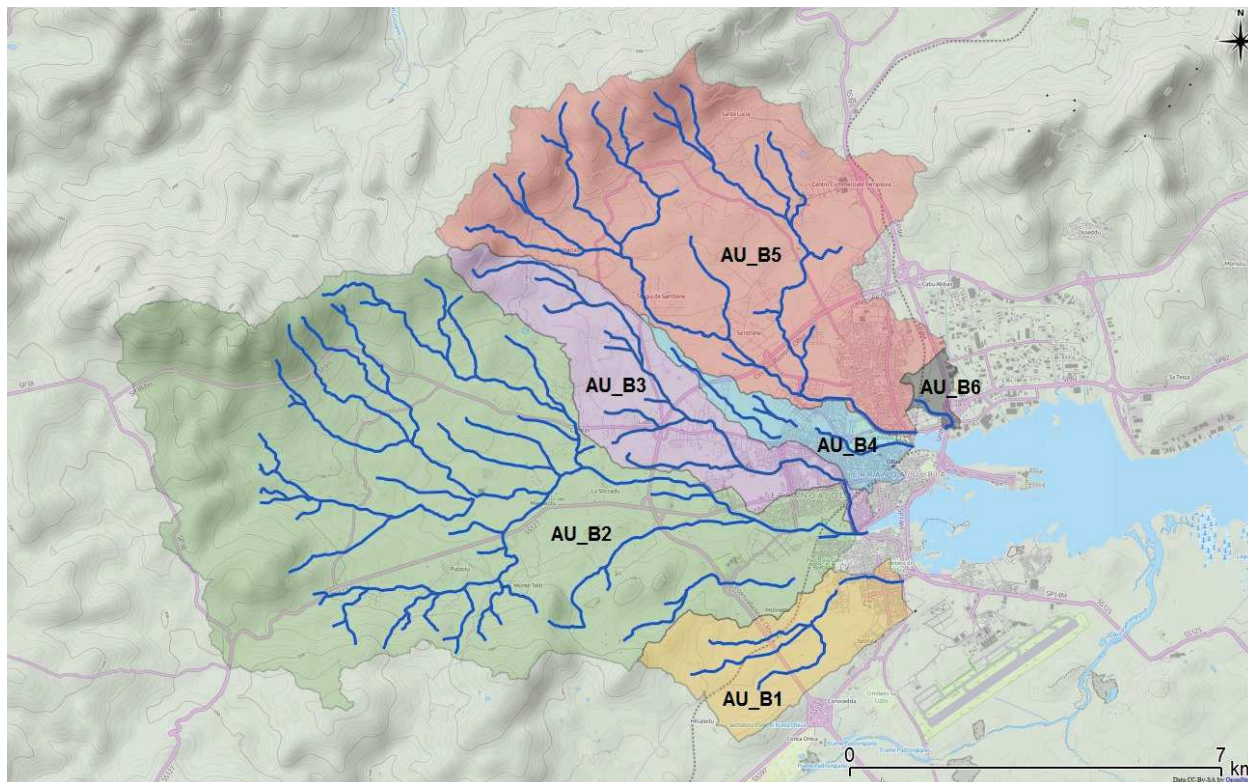


Figura 4. Individuazione dei bacini idrografici afferenti alle diverse strutture del reticolo di drenaggio.

Tabella 1. Caratteristiche morfologiche dei bacini idrografici.

Bacino	AU_B1	AU_B2	AU_B3	AU_B4	AU_B5	AU_B6
Area [km ²]	4.4	38.4	7.0	2.2	20.0	0.5
Perimetro [km]	10.8	31.7	16.8	10.7	24.6	3.7
Lunghezza asta principale [km]	3.9	12.3	8.2	4.7	8.1	0.9
Quota max. [m.s.m.]	148.4	721.9	311.5	35.9	467.7	15.3
Quota min. [m.s.m.]	3.3	1.9	2.3	0.2	0.2	0.2
Quota media [m.s.m.]	34.4	141.9	46.9	10.6	95.1	7.4
Pendenza media [%]	6.3	16.5	6.4	1.9	11.7	2.6

2 L'EVENTO ALLUVIONALE DEL 18 NOVEMBRE 2013

Il giorno 18 Novembre 2013 la Sardegna è stata interessata da un evento meteorico che ha causato precipitazioni di carattere eccezionale. Le precipitazioni più intense hanno interessato la Sardegna Orientale, dal bacino del Flumendosa al bacino del Liscia, e vaste aree del Campidano, dalla bassa valle del Cixerri all'alto Oristanese. Nei due giorni precedenti l'area costiera della Gallura era già stata interessata da precipitazioni che il giorno 16 avevano interessato anche le Baronie e la Barbagia di Nuoro, e che, a Siniscola, hanno raggiunto valori superiori a 100mm. Nelle aree interessate dall'evento sono presenti stazioni di rilevamento della Direzione Generale agenzia

regionale del Distretto idrografico della Sardegna, appartenenti alla rete con registrazione digitale e trasmissione dei dati via radio e stazioni della rete di tipo tradizionale. La figura seguente riporta l'ubicazione delle stazioni della rete dell'ARDIS, integrate con le stazioni gestite dall'ENAS, e consente, per mezzo delle isoiete delle precipitazioni cumulate del giorno 18 novembre una rapida individuazione delle aree caratterizzate dalle maggiori precipitazioni.

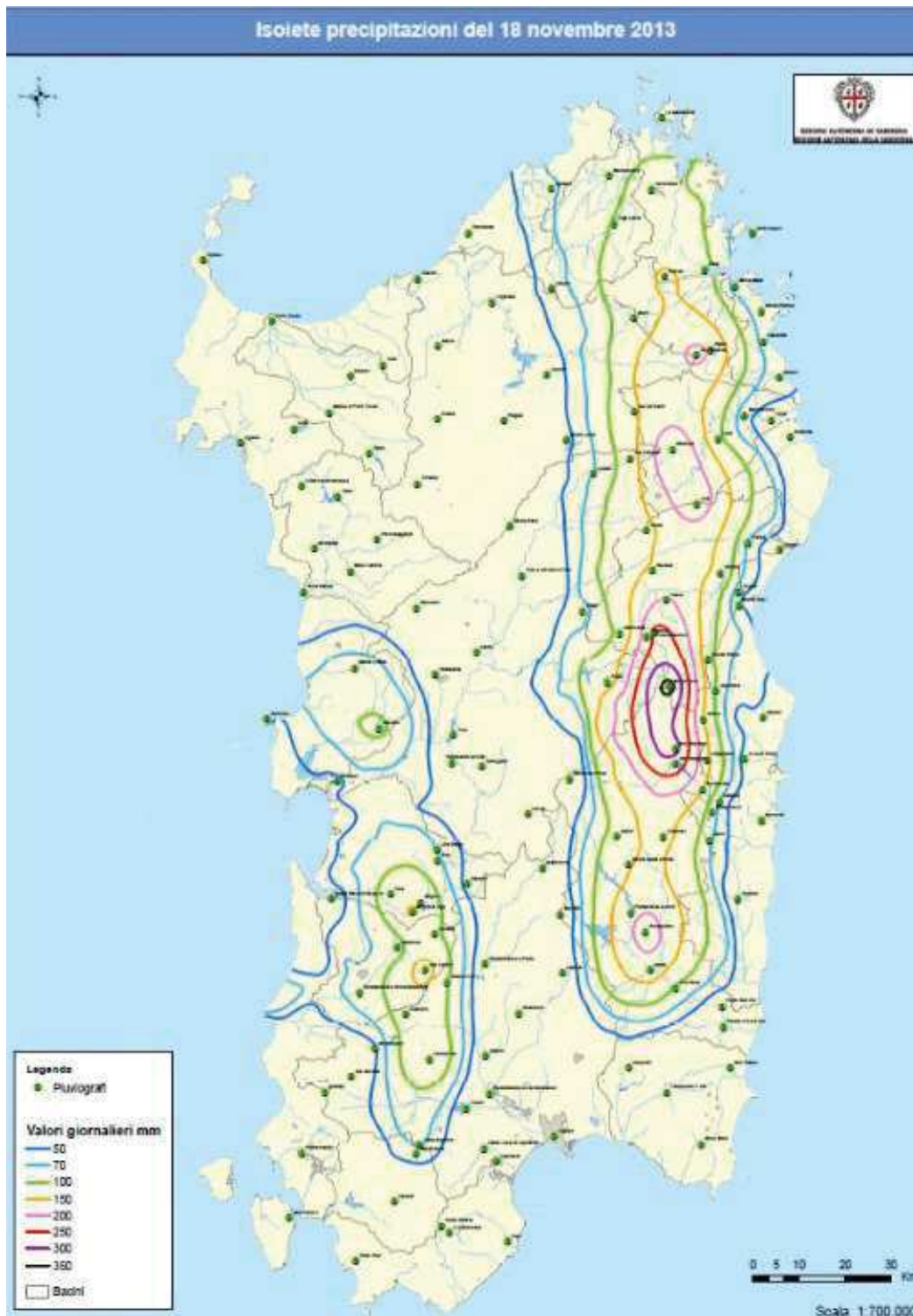


Figura 5. Indicazione dei pluviografi e delle isoiete delle precipitazioni del 18 novembre 2013 (Fonte: Relazione Evento Distretto Idrografico) .

La distribuzione spaziale dell'evento meteorico può inoltre essere riscontrata nelle immagini radar della stazione di Monte Rasu.

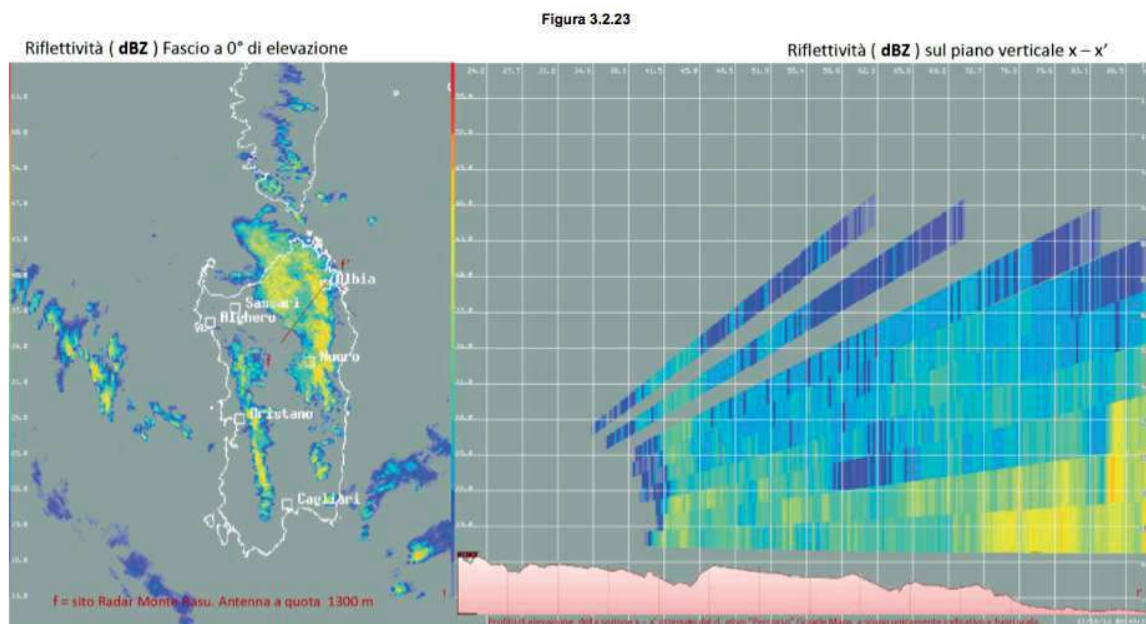


Figura 6. Immagine radar dell'evento del 18 novembre 2013 (sito Radar Monte Rasu, Fonte ARPAS rel. evento).

I dati disponibili ed utili alla ricostruzione idrologica-idraulica dell'evento sono i dati di precipitazione oraria per le stazioni di: Olbia, Putzolu, Monti, Golfo Aranci, Sa Pianedda, Murta Maria e Monte Petrosu. Successivamente all'evento sono inoltre state perimetrare le aree interessate da allagamenti nel centro urbano di Olbia e, nella procedura di censimento danni, sono stati misurati i livelli che si sono manifestati all'interno di abitazioni e strutture. Non avendo a disposizione misure di portata dell'evento questi ultimi dati risultano molto utili in fase di calibrazione del modello che viene utilizzato ai fini della ricostruzione dell'evento ed applicato in seguito per tutte le valutazioni di carattere idrologico ed idraulico: valutazione delle portate di piena a differente frequenza, aree allagate allo stato attuale e nello scenario di progetto.

2.1 DATI PLUVIOMETRICI

Si riporta di seguito la posizione dei pluviometri, dei quali si dispone della serie oraria delle precipitazioni dell'evento del 18 novembre 2013, in relazione ai bacini idrografici in analisi. Come si può osservare solo i pluviometri di Olbia e Putzolu rientrano nei bacini in analisi o nelle loro immediate vicinanze, ma è tuttavia utile considerare anche i pluviometri circostanti, seppur distanti più di 10 km, per una migliore ricostruzione spaziale dell'evento meteorico. Il modello idrologico che verrà utilizzato, del quale si dirà nei capitoli successivi, è infatti un modello di tipo distribuito in grado quindi di simulare la formazione e la propagazione del deflusso di piena considerando la

variabilità spaziale dei flussi in ingresso e dei parametri che definiscono i processi al suolo con una fine risoluzione spaziale e temporale.

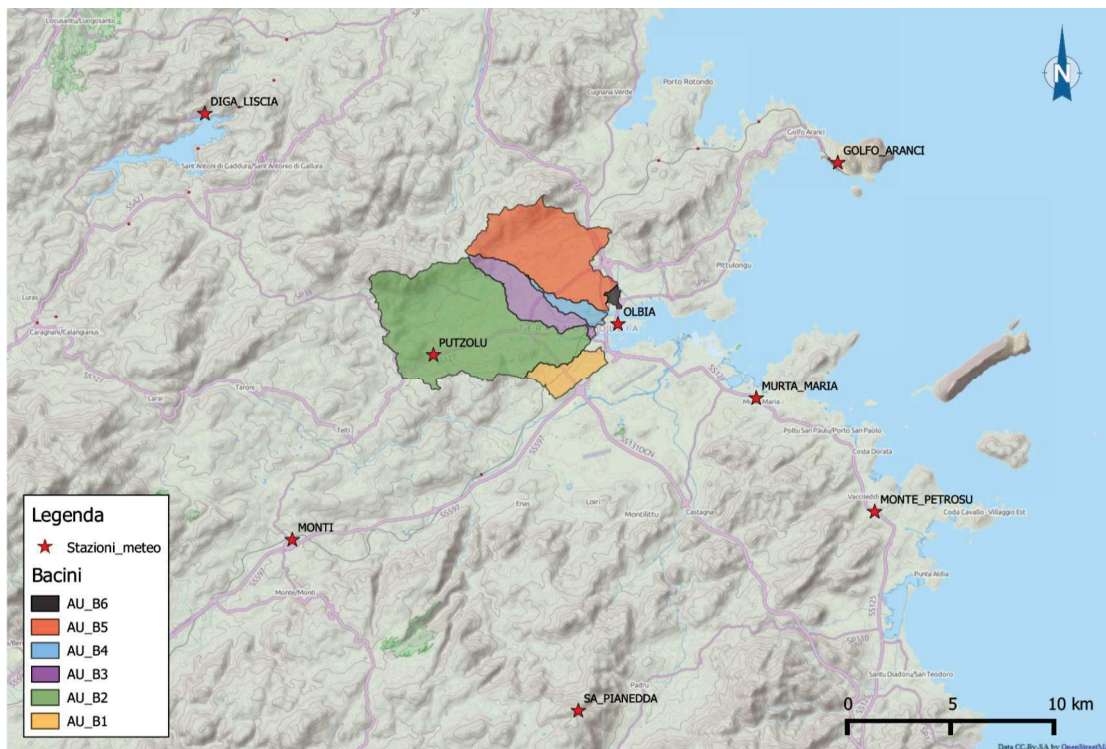


Figura 7. Pluviometri e loro posizione utilizzati per la ricostruzione idrologica dell’evento.

Di seguito si riportano, in forma grafica, le altezze di pioggia orarie misurate durante l’evento dai pluviometri che verranno utilizzati per la ricostruzione idrologica d’evento.

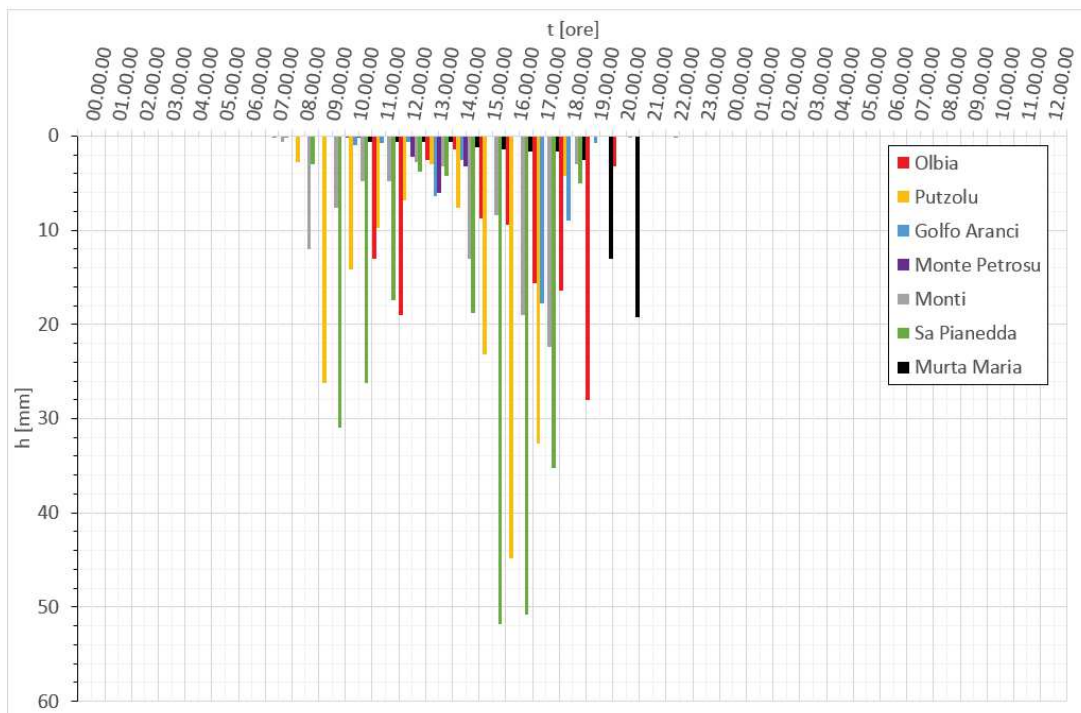


Figura 8. Altezze di pioggia oraria durante l’evento per i pluviometri utilizzati per la ricostruzione idrologica dell’evento del 18 novembre 2013.

I valori di pioggia che più influenzano i bacini in analisi sono, come precedentemente indicato, quelli registrati dai pluviometri di Olbia e Putzolu. Risulta quindi utile analizzare separatamente tali valori dai quali è possibile osservare la differente intensità spaziale che l'evento ha manifestato. Al pluviometro di Putzolu infatti si registrano altezze di pioggia maggiori, cumulata giornaliera di 172.5 mm, rispetto al pluviometro di Olbia dove la cumulata giornaliera è di 117.6 mm.

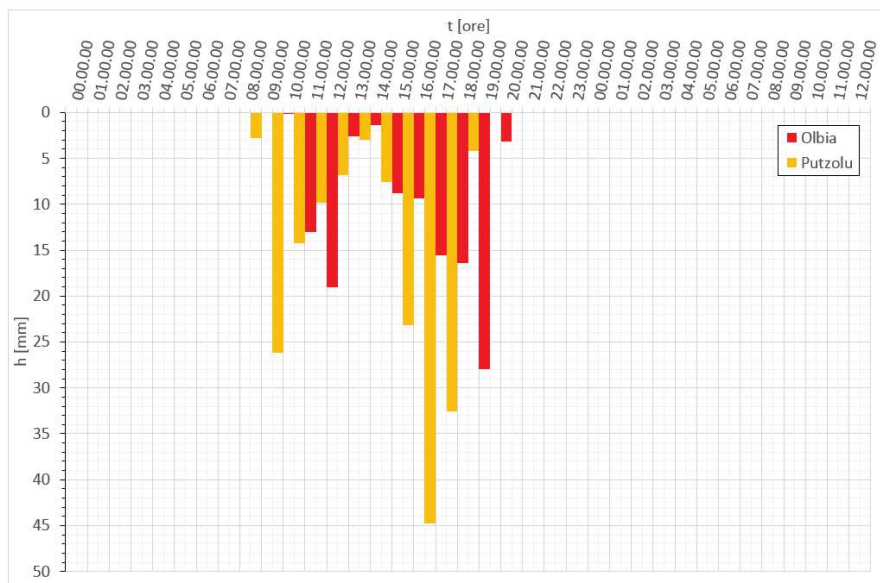


Figura 9. Altezze di pioggia orarie durante l'evento del 18 novembre 2013 per i pluviometri di Olbia e Putzolu.

2.1.1 Evento Pluviometrico del 18 novembre 2013: Caratterizzazione in frequenza.

Definita e validata la linea segnalatrice di possibilità pluviometrica di riferimento, che di seguito si definirà come LSPP VAPI (Rel. A03), si procede alla caratterizzazione in frequenza dell'evento del 18 novembre 2013. Tale analisi viene condotta sovrapponendo alla LSPP VAPI, per le differenti durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore, i valori registrati durante l'evento per i pluviometri di Olbia e Putzolu.

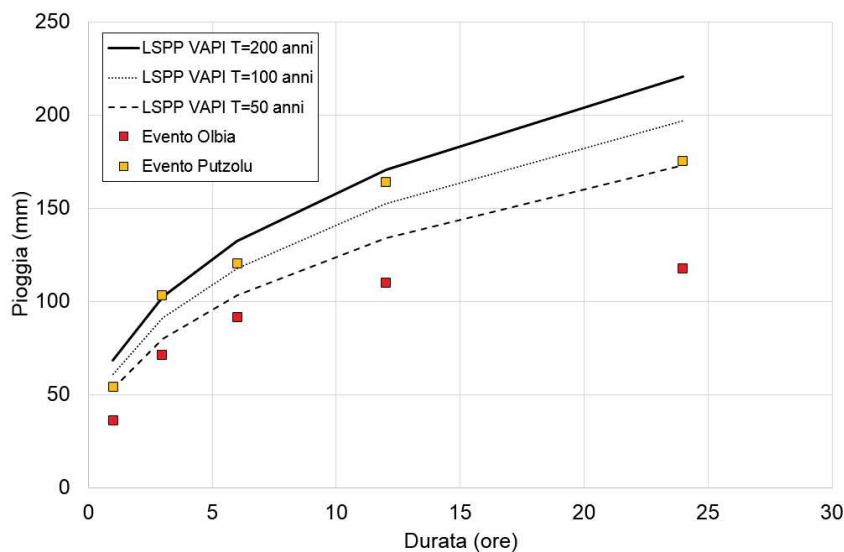


Figura 10. Caratterizzazione in frequenza delle piogge del 18 novembre 2013 ai pluviografi di Olbia e Putzolu.

Le analisi condotte mostrano, per l'evento del 18 novembre 2013, una frequenza di accadimento prossima ad un tempo di ritorno di circa 200 anni per le durate da 1 a 12 ore per la stazione di Putzolu, mentre per la stazione di Olbia l'evento mostra una frequenza di accadimento prossima ad un tempo di ritorno di circa 50 anni per le durate da 1 a 6 ore. Per la sua natura tale analisi non può che avere valore puntuale in prossimità della stazione pluviometrica di misura, è tuttavia significativa la differenza in termini di altezza di precipitazione e di frequenza per le due stazioni analizzate, che è imputabile alla forte variabilità spaziale, anche influenzata dalla topografia delle aree in studio, tipica degli eventi meteorici come quello in esame.

2.2 AREE ALLAGATE CENSITE NELL'EVENTO

A seguito dell'evento alluvionale sono state perimetrare dall'ufficio tecnico del Comune di Olbia le aree interessate da allagamenti nel centro urbano di Olbia. Sono inoltre disponibili, a seguito della procedura di censimento danni, i livelli che si sono manifestati all'interno di abitazioni e strutture. Il complesso dei dati disponibili permette di avere quindi la definizione planimetrica delle aree allagate e seppur in modo approssimato, dei tiranti idrici massimi che si sono registrati durante l'evento. La figura seguente mostra l'estensione delle aree allagate durante l'evento del 18 novembre 2013 ed i punti dove sono disponibili misure del tirante massimo all'interno delle abitazioni e delle strutture interessate da allagamenti.

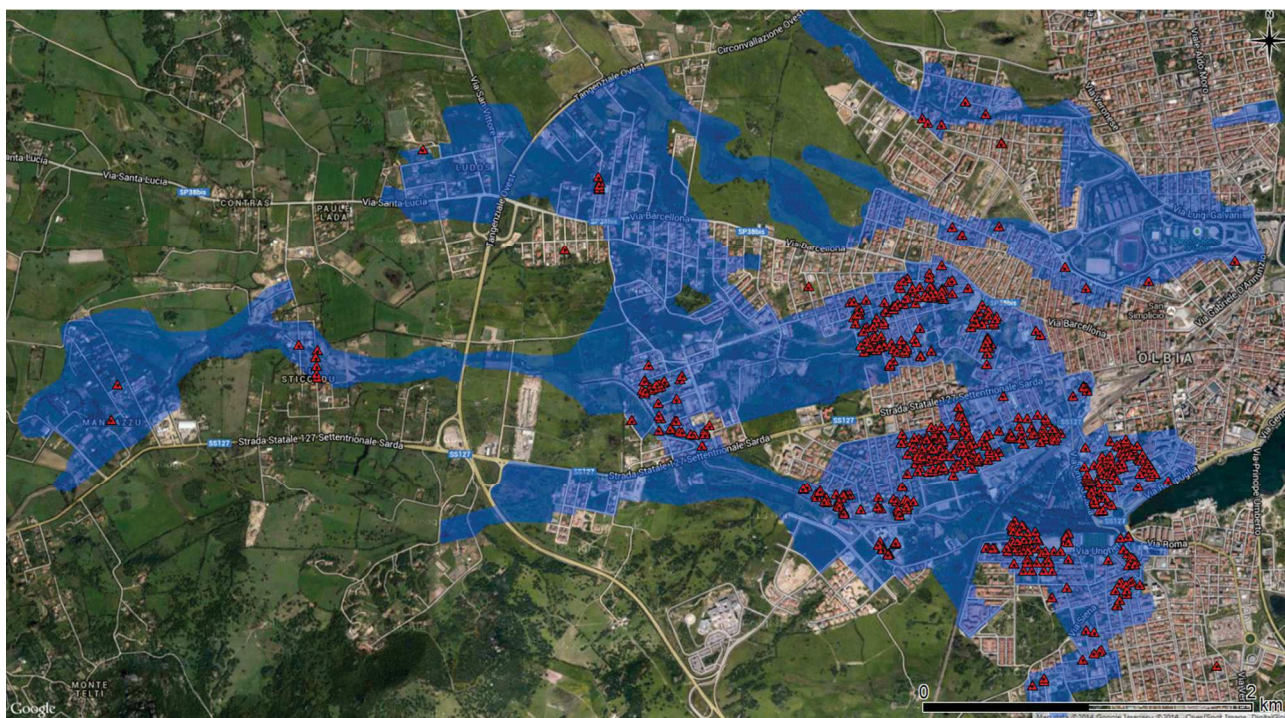


Figura 11. Aree allagate e punti dei quali si dispone dell'altezza d'acqua massima registrata all'interno delle abitazioni e strutture interessate da allagamenti.

3 MODELLAZIONE IDROLOGICA DELL'EVENTO

In questo capitolo verrà analizzata la ricostruzione idrologica dell'evento del 18 novembre 2013 analizzando nel dettaglio i parametri assunti per la modellazione. Non essendoci misure di portata per l'evento non è possibile effettuare una calibrazione diretta del modello utilizzato, ma solo una valutazione a seguito della modellazione idraulica attraverso il confronto con le aree inondate e i loro livelli. Il dato delle aree allagate e del censimento danni permette infatti di valutare complessivamente la rispondenza del modello idrologico ed idraulico.

3.1 IL MODELLO DISTRIBUITO DELLA TRASFORMAZIONE AFFLUSSI DEFLUSSI

Il modello idrologico idraulico FEST-RS (acronimo di Flash – flood Event – based Spatially – distributed rainfall – runoff Transformation, including Reservoirs System), rientra in quella categoria nota nella letteratura scientifica come modelli idrologici distribuiti. La prerogativa di questo modello è quella di simulare la formazione e la propagazione del deflusso di piena considerando la variabilità spaziale dei flussi in ingresso e dei parametri che definiscono i processi al suolo con una fine risoluzione spaziale e temporale, permettendo di calcolare l'idrogramma di piena in una qualsiasi sezione lungo il reticolo idrografico (Mancini, 1990 e 1998)¹. La risoluzione spaziale deriva dalle dimensioni della cella elementare in cui si suddivide la superficie del bacino all'interno della quale le proprietà topografiche idrologiche ed idrauliche sono ipotizzate continue ed omogenee. Ciò permette di quantificare i processi fisici che determinano l'idrogramma di piena localmente e quindi di valutarne poi gli effetti complessivi in termini di portata per ciascuna sezione del reticolo idrografico.

Il modello si divide in tre componenti principali (Figura seguente). La prima estrae dalla matrice delle quote (DEM) le direzioni di scorrimento e, quindi, distingue i versanti dal reticolo idrografico (Carrara, 1988; Montgomery e Foufoula-Georgiou, 1993; Tarboton, 1997). Tale distinzione è ottenuta stabilendo un'area di drenaggio minima al di sopra della quale le celle in cui è suddivisa la superficie del bacino vanno a comporre il reticolo di drenaggio alveato.

¹ M.,Mancini, La modellazione della risposta idrologica: effetti della variabilità spaziale e della scala di rappresentazione del fenomeno dell'assorbimento, Tesi di Dottorato Politecnico di Milano, 1990;
M. Mancini M., S. Orlandini, R.Rosso, Su un Modello Idrologico Distribuito dei fenomeni di Piena con Aggiornamento continuo dello stato di imbibimento del suolo e della copertura vegetale, Idrotecnica, vol. 1, pp. 3-17, 1995
Rabuffetti, D., Ravazzani, G., Barbero, S., Mancini, M.), Operational flood-forecasting in the Piemonte region - development and verification of a fully distributed physically-oriented hydrological model. Adv. Geosci., 17, 111-117; 2009.
Corbari C., G. Ravazzani, M. Mancini "A distributed thermodynamic model for energy and mass balance computation: FEST-EWB", Journal of Hydrological Processes 2010.
Ravazzani.G P. Gianoli, S. Meucci, M. Mancini, Indirect estimation of design flood in urbanized river basins using a distributed hydrological model, J Hydrologic Engineering, ASCE doi 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000764, 2013.

www.fest.polimi.it per ulteriori articoli

Nella seconda parte il modello elabora l'informazione pluviometrica. La pioggia registrata a scala puntuale dai pluviografi presenti sul bacino può essere utilizzata sia come valore ragguagliato alla superficie del bacino secondo il metodo di Thiessen, che come precipitazione distribuita. Il tasso di ruscellamento in ogni cella viene calcolato tramite la rielaborazione in forma differenziale del metodo globale SCS – CN proposto dal Soil Conservation Service (1972 e 1975) secondo lo schema illustrato, tra gli altri, da Mancini e Rosso (1989). Le condizioni di umidità del suolo antecedenti l'evento sono valutate in base all'indice AMC (acronimo di "Antecedent Moisture Condition"). Esso consente di modificare localmente la massima capacità di ritenzione potenziale del terreno in ragione dello stato di imbibimento e, nel caso di precipitazione distribuita, viene stimato per ogni area di influenza dei pluviografi.

Nella terza parte sono implementate le equazioni che descrivono la propagazione del deflusso superficiale sui versanti, nel reticolo idrografico e attraverso gli invasi artificiali. Il trasferimento del deflusso superficiale sui versanti e nel reticolo idrografico si ottiene con un metodo di propagazione idrologica basato sul metodo Muskingum – Cunge (Cunge, 1969) nella sua forma non lineare, che si basa sul calcolo della celerità di propagazione in rete variabile nel tempo (Ponce, 1989; Ponce e Yevjevich, 1978; Ponce e Chaganti, 1994).



Figura 12. Diagramma a blocchi del modello idrologico idraulico FEST-RS.

3.2 DATI UTILIZZATI

I dati utilizzati per la definizione dei parametri del modello idrologico per la ricostruzione dell'evento del 18 novembre 2013 vengono di seguito riportati:

- Idrografia derivante dalla Carta dell'uso del suolo integrata con la cartografia di settore comunale;

- Base topografica del Modello Digitale del Terreno (DTM) con risoluzione spaziale a celle di 10m x 10 m;
- Carta dell'uso del suolo (2008);
- Carta geologica (2009);
- Dati di precipitazione oraria per le stazioni di: Olbia, Putzolu, Monti, Golfo Aranci, Sa Pianedda, Murta Maria e Monte Petrosu;

3.3 BACINI IDROGRAFICI

I bacini idrografici di interesse per la ricostruzione idrologica dell'evento alluvionale del 18 novembre 2013 sono quelli sottesi alle sezioni terminali, corrispondenti con la foce a mare, del reticolo di drenaggio del centro urbano della città di Olbia ed analizzati nei capitoli precedenti. In particolare:

- AU_B1, afferente al reticolo idrografico del Riu Paule Longa;
- AU_B2, afferente al reticolo idrografico del Riu Seligheddu;
- AU_B3, afferente al reticolo idrografico del Riu Gadduresu;
- AU_B4, afferente al reticolo idrografico del Canale Zozò;
- AU_B5, afferente al reticolo idrografico del Riu San Nicola;
- AU_B6, afferente al reticolo idrografico del Riu Tilibas;

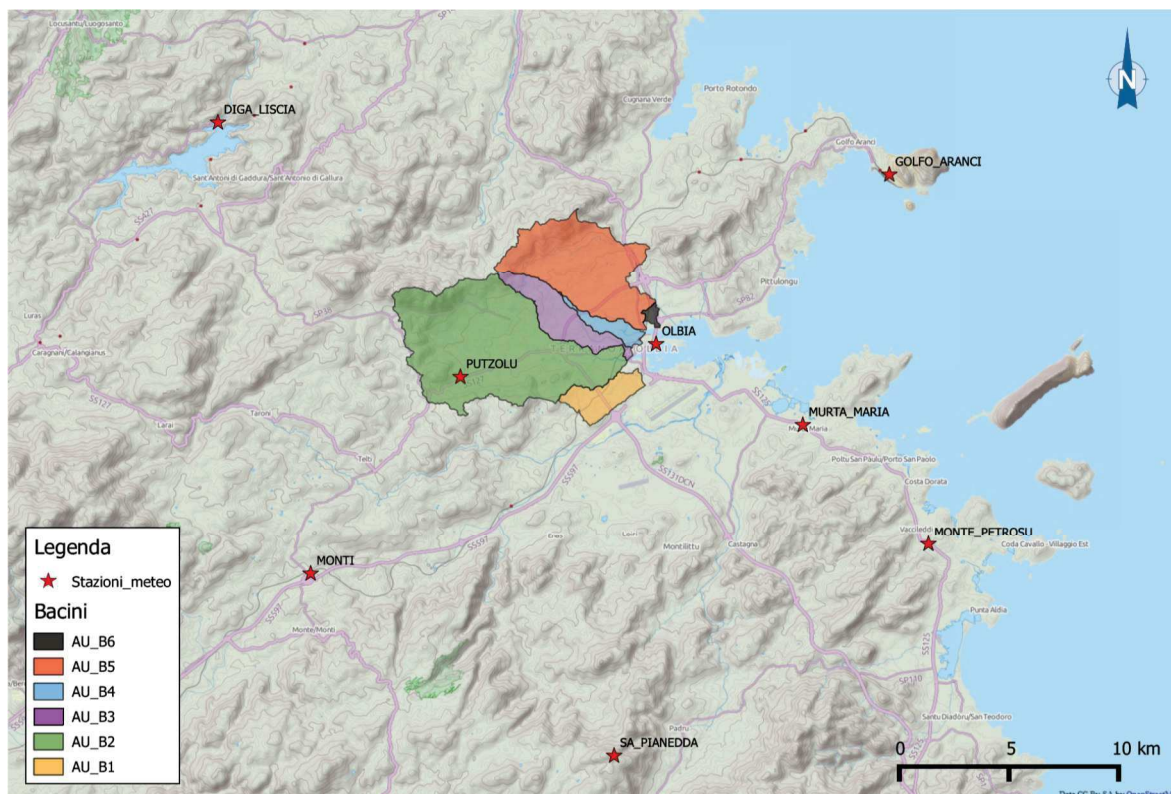


Figura 13. Bacini idrografici e stazioni pluviometriche di interesse per la ricostruzione idrologica dell'evento del 18 novembre 2013.

3.4 PARAMETRI DI ASSORBIMENTO

Il modello idrologico utilizza per la definizione del tasso di ruscellamento il metodo SCS – CN proposto dal Soil Conservation Service.

Scritta l'equazione di continuità nella forma:

$$Q(t) = P(t) - S'(t)$$

dove $Q(t)$ [mm] è il volume defluito fino all'istante t , mentre $P(t)$ [mm] ed $S'(t)$ [mm] sono i volumi rispettivamente affluito ed infiltrato fino al medesimo istante t , il modello "Curve Number" ipotizza che sussista la seguente relazione di proporzionalità:

$$\frac{S'(t)}{S} = \frac{Q(t)}{P(t)}$$

dove S [mm] è il volume massimo immagazzinabile nel terreno a saturazione. Il volume S viene fatto dipendere da un ulteriore parametro, denominato CN, attraverso la relazione:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

il valore di CN è compreso tra 0 e 100 ed è funzione delle caratteristiche del terreno (CN=0 per bacini assolutamente permeabili, CN=100 per bacini assolutamente impermeabili).

Il volume defluito all'istante t ($Q(t)$) può essere dunque definito come:

$$Q(t) = \frac{P^2(t)}{(P(t) + S)}$$

Per tener conto della parte di precipitazione che va ad invasarsi nelle depressioni superficiali o si infiltra prima che il deflusso abbia inizio al posto del volume $P(t)$ complessivamente affluito fino all'istante t si può sostituire il termine $P(t)-I_a$, essendo I_a [mm] la depurazione iniziale o "Initial abstraction".

Trattandosi di un modello idrologico di tipo distribuito il valore del CN deve essere definito su ogni cella costituente il modello di calcolo. La stima del CN presuppone, inizialmente, la determinazione del gruppo idrologico di ciascun suolo ricadente nel bacino e, all'interno di ciascun gruppo, l'individuazione di aree omogenee per destinazione d'uso del suolo stesso.

I valori di riferimento sono stati dunque ottenuti dall'analisi combinata della Carta dell'uso del suolo e della Carta geologica.

Tabella 2. Valori del parametro CNII per diversi tipi di suolo e di copertura.

Tipo di copertura (uso di suolo)	Tipo di suolo			
	A	B	C	D
TERRENO COLTIVATO				
senza trattamento di conservazione	72	81	88	91
con interventi di conservazione	62	71	78	81
TERRENO DI PASCOLO				
cattive condizioni	68	79	86	89
buone condizioni	39	61	74	80
PRATERIE				
buone condizioni	30	58	71	78
TERRENI BOSCOSI O FORESTATI				
terreno sottile, sottobosco povero, senza foglie	45	66	77	83
sottobosco e copertura buoni	25	55	70	77
SPAZI APERTI, PRATI RASATI, PARCHI				
buone condizioni con almeno il 75% con copertura erbosa	39	61	74	80
condizioni normali, con copertura erbosa intorno al 50%	49	69	79	84
AREE COMMERCIALI (Impermeabilità 85%)	89	92	94	95
DISTRETTI INDUSTRIALI (Impermeabilità 72%)	81	88	91	93
AREE RESIDENZIALI Impermeabilità media %				
Impermeabilità media 65%	77	85	90	92
Impermeabilità media 38%	61	75	83	87
Impermeabilità media 30%	57	72	81	86
Impermeabilità media 25%	54	70	80	85
Impermeabilità media 20%	51	68	79	84
PARCHEGGI IMPERMEABILIZZATI, TETTI	98	98	98	98
STRADE				
pavimentate con cordoli e fognature	98	98	98	98
inghiaiate o selciate con buche	76	85	89	91
in terra battuta (non asfaltate)	72	82	87	89

Tabella 3. Classificazione dei suoli, secondo il Soil Conservation Service (SCS).

Tipo di suolo	Descrizione
GRUPPO A	Suoli aventi scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde, con scarsissimo limo ed argilla e ghiaie profonde, molto permeabili. Capacità di infiltrazione in condizioni di saturazione molto elevata.
GRUPPO B	Suoli aventi moderata potenzialità di deflusso. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A. Elevata capacità d'infiltrazione anche in condizioni di saturazione.
GRUPPO C	Suoli aventi potenzialità di deflusso moderatamente alta. Suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali. Scarsa capacità di infiltrazione e saturazione.
GRUPPO D	Potenzialità di deflusso molto elevata. Argille con elevata capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie. Scarsissima capacità di infiltrazione a saturazione.

L'analisi, svolta con la consulenza geologica del Dott. Giovanni Tilocca, ha anche tenuto in conto sia della morfologia della piana di Olbia sia degli effetti delle colmate della bonifica nell'individuazione delle differenti tipologie idrologiche di suolo. In particolare: la zona a monte dei bacini, caratterizzata dalle pendenze più elevate, è stata identificata con un tipo di suolo C così come l'area compresa tra la costa ed indicativamente tra la cintura definita dal tracciato della tangenziale ovest. Tra queste due aree si è invece individuato un tipo di suolo con caratteristiche assimilabili al gruppo B.

Il metodo tiene anche conto delle condizioni di umidità del suolo antecedenti all'inizio dell'evento (Antecedent Moisture Conditions, AMC) e a tal fine va precisato che i valori di riferimento del parametro CN si riferiscono a condizioni medie del parametro AMC denominate AMCII.

La definizione di AMC richiede la determinazione della precipitazione totale caduta nei cinque giorni precedenti l'evento in esame che, sulla base della tabella seguente, consente di definire la condizione di umidità antecedente l'evento (AMCI, AMCII, AMCIII).

Tabella 4. Definizione delle condizioni di umidità antecedenti l'evento (AMC).

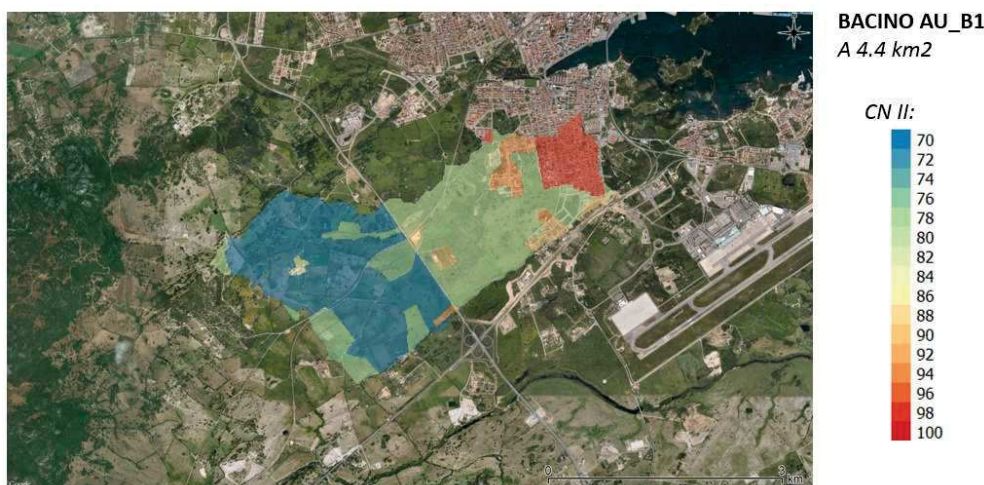
Periodo vegetativo	Riposo vegetativo	AMC
Altezza di precipitazione caduta nei cinque giorni precedenti l'evento minore di 35 mm	Altezza di precipitazione caduta nei cinque giorni precedenti l'evento minore di 13 mm	I
Altezza di precipitazione caduta nei cinque giorni precedenti l'evento tra 35 e 53 mm	Altezza di precipitazione caduta nei cinque giorni precedenti l'evento tra 13 e 28 mm	II
Altezza di precipitazione caduta nei cinque giorni precedenti l'evento maggiore di 53 mm	Altezza di precipitazione caduta nei cinque giorni precedenti l'evento maggiore di 28 mm	III

Nel caso in cui si ricada nelle condizioni AMCI (secca) o in quella AMCIII (umida) devono essere calcolati i rispettivi valori del CN applicando le formule di passaggio da CNII per il calcolo dei rispettivi valori CNI ed CNIII:

$$CNI = 0.3 + 0.00636 \cdot CNII$$

$$CNIII = 3.4212 - 1.1999 \cdot \log CNII$$

I dati di pioggia mostrano, per tutte le stazioni analizzate nei giorni del 16 e 17 novembre 2013, un'altezza di pioggia cumulata prossima o superiore a 80 mm che definisce dunque una condizione di umidità antecedente l'evento di tipo AMCIII. Di seguito si riportano le matrici di assorbimento, nelle condizioni di riferimento AMCII, relative ai bacini di interesse.



Valore medio del CN II: 77.7

Figura 14. Matrice di assorbimento del bacino AU_B1.

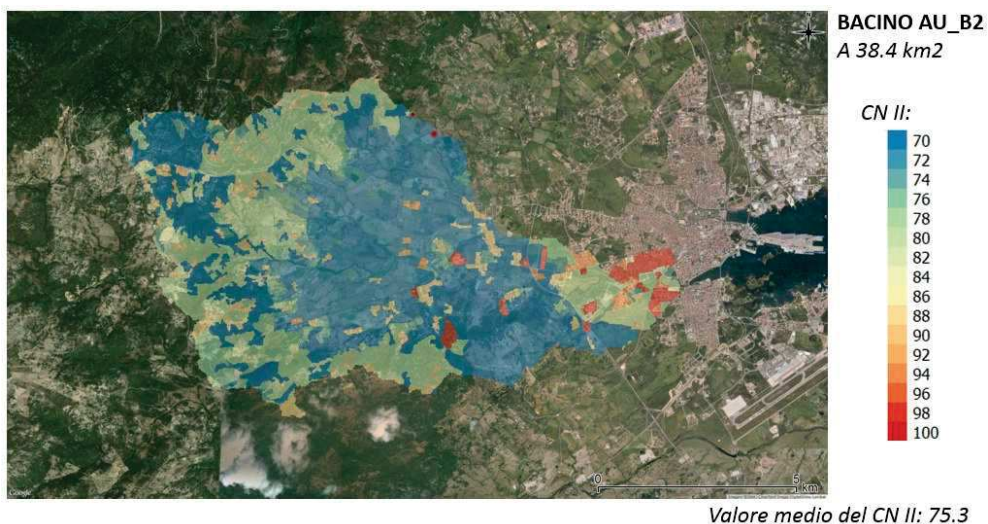


Figura 15. Matrice di assorbimento del bacino AU_B2.

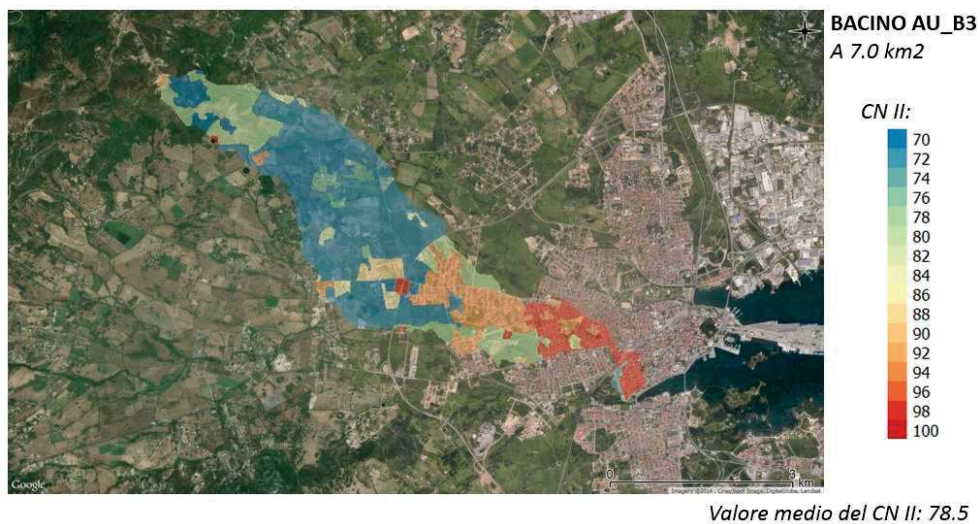


Figura 16. Matrice di assorbimento del bacino AU_B3.

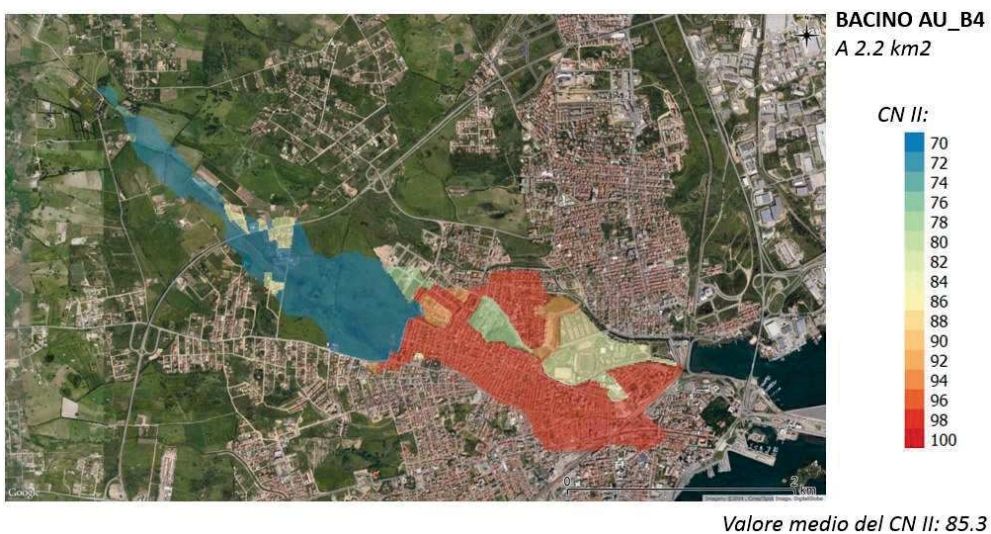


Figura 17. Matrice di assorbimento del bacino AU_B4.

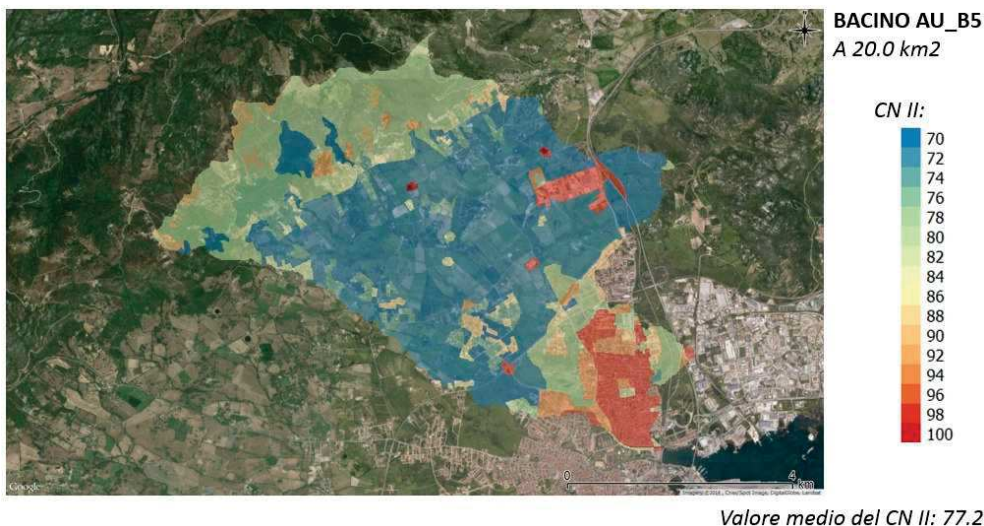


Figura 18. Matrice di assorbimento del bacino AU_B5.



Figura 19. Matrice di assorbimento del bacino AU_B6.

3.5 PARAMETRI DI PROPAGAZIONE IDRAULICA

Nel modello idrologico idraulico FEST-RS la propagazione del deflusso superficiale sui versanti, nel reticolo idrografico e attraverso gli invasi artificiali si ottiene con un metodo di propagazione idrologica basato sul metodo Muskingum – Cunge, che si basa sul calcolo della celerità di propagazione in rete variabile nel tempo che risulta funzione delle caratteristiche idrauliche di scabrezza e rapporto di sezione idraulica base/altezza. Il modello permette di suddividere il reticolo in differenti tratti a seconda delle caratteristiche idrauliche presenti. In particolare si è suddiviso il bacino in:

- Aree di versante: caratterizzato da un rapporto b/h molto alto ed un fattore di scabrezza di Strickler basso;
- Aree di impluvio: caratterizzato da un rapporto b/h intermedio e da un fattore di scabrezza

leggermente più alto rispetto al versante.

- Canalizzazione 1, 2 o 3: in relazione ai differenti tratti da monte verso valle. Caratterizzate da un rapporto b/h basso ed un fattore di scabrezza tipico delle sezioni fluviali.



Figura 20. Situazioni tipiche riscontrate, da sinistra verso destra e dall'alto verso il basso: impluvio, caratterizzato da sezioni non incise e dalla presenza di vegetazione; situazione intermedia tra impluvio e canalizzazione, caratterizzato da sezioni mediamente incise e presenza di vegetazione; canalizzazione tipo 1 o 2, caratterizzata da sezioni incise e sponde e fondo naturali con presenza di vegetazione; canalizzazione tipo 3, caratterizzata da sezioni incise con sponde e fondo rivestiti con eventuale presenza di vegetazione sul materiale di deposito.

Di seguito si riporta la classificazione del reticolo idrografico e del versante con l'indicazione dei parametri utilizzati nella propagazione idrologica tramite il metodo di Muskingum – Cunge. Anche tale analisi ha visto il conforto della consulenza del Dott. Giovanni Tilocca per la parte morfologica.

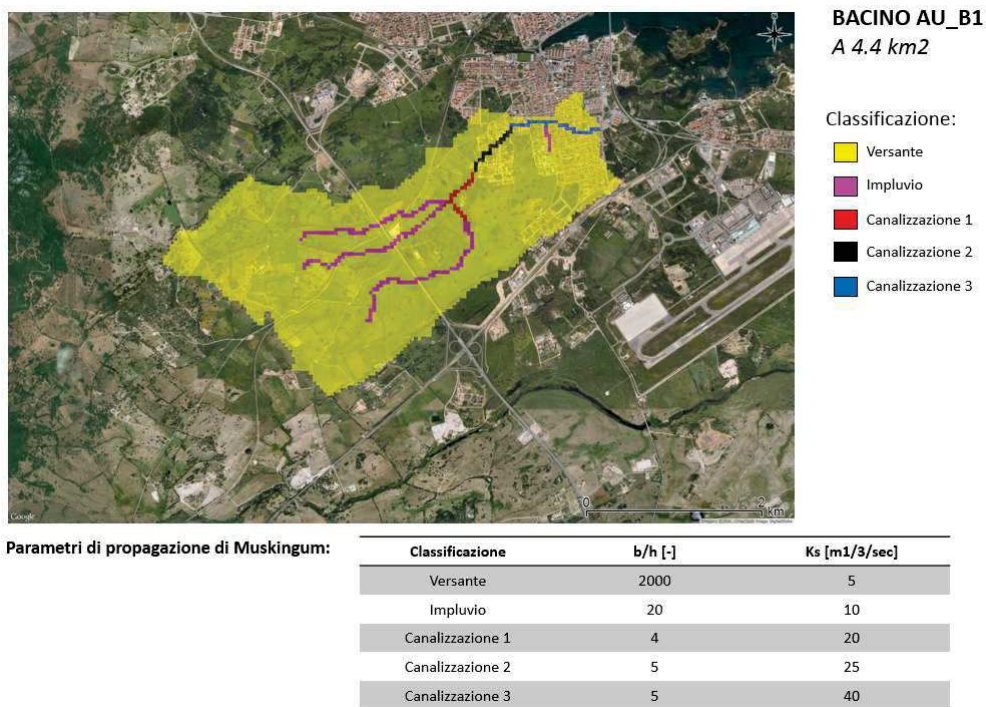


Figura 21. Classificazione del versante e del reticolo e parametri di propagazione del bacino AU_B1.

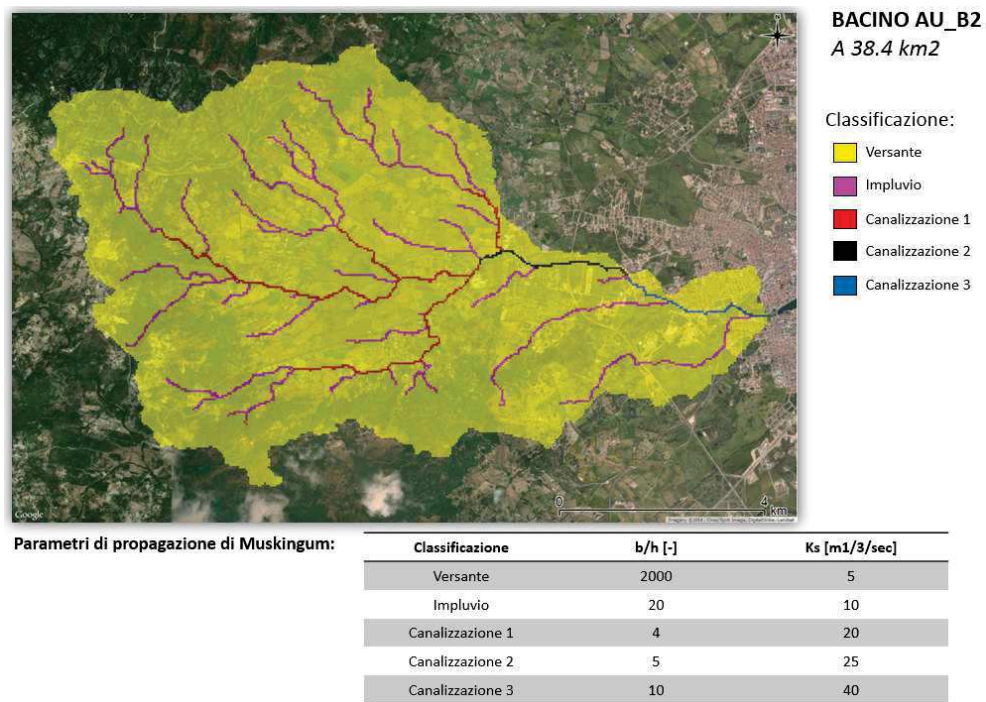


Figura 22. Classificazione del versante e del reticolo e parametri di propagazione del bacino AU_B2.

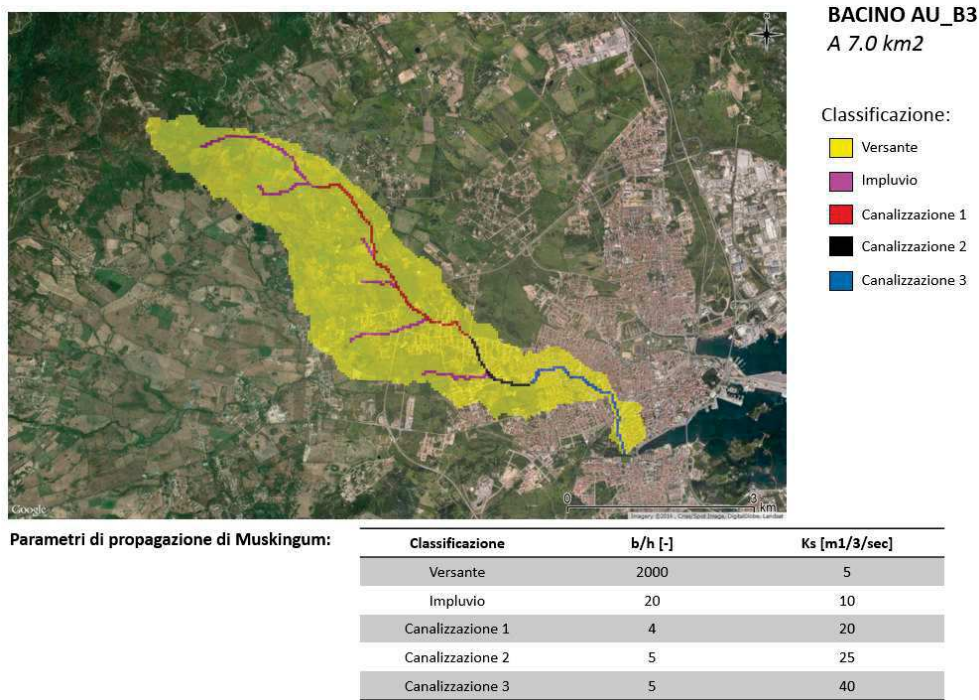


Figura 23. Classificazione del versante e del reticolo e parametri di propagazione del bacino AU_B3.

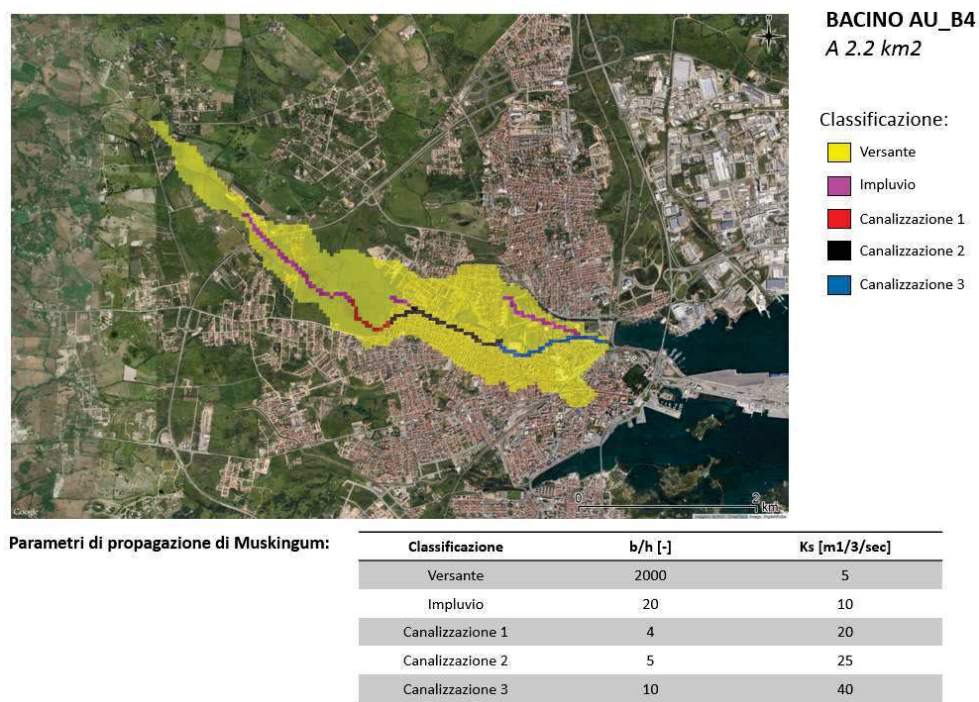


Figura 24. Classificazione del versante e del reticolo e parametri di propagazione del bacino AU_B4.

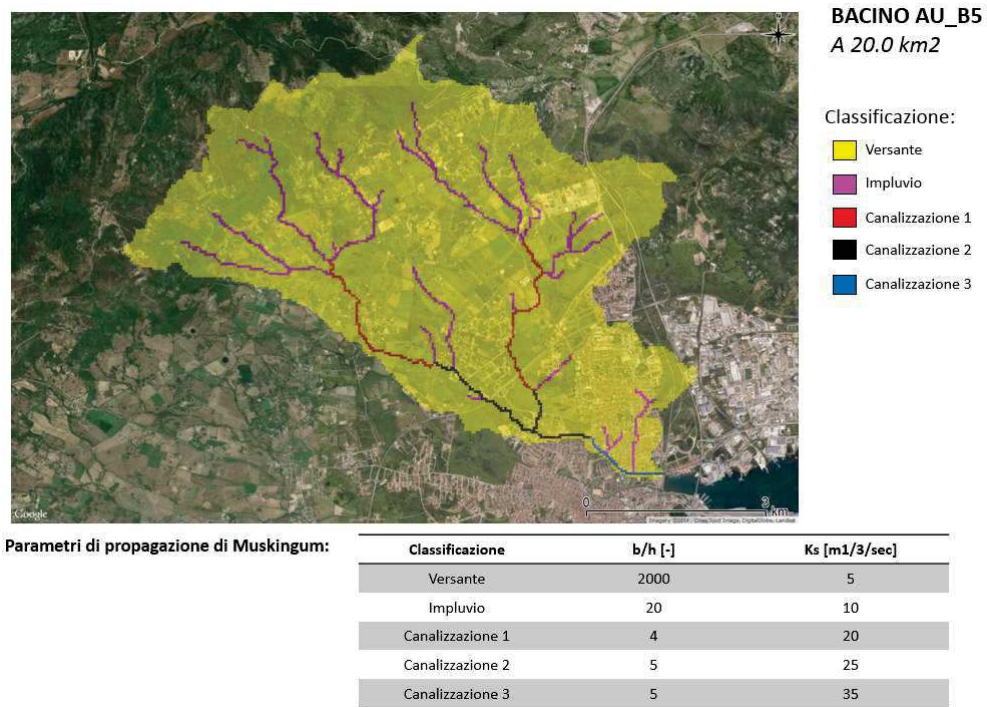


Figura 25. Classificazione del versante e del reticolo e parametri di propagazione del bacino AU_B5.

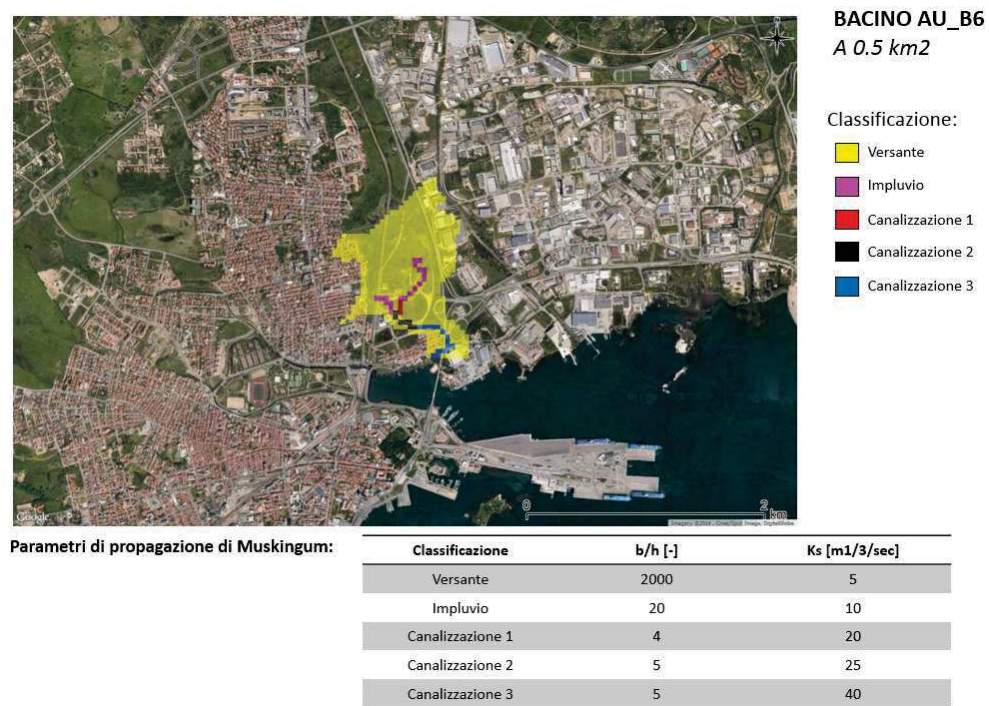


Figura 26. Classificazione del versante e del reticolo e parametri di propagazione del bacino AU_B6.

3.6 RICOSTRUZIONE DEGLI IDROGRAMMI DELL'EVENTO ALLUVIONALE

Il modello idrologico idraulico restituisce gli idrogrammi nelle sezioni idrografiche di interesse dei diversi bacini. In prima analisi si farà riferimento alla sezione di chiusura di tutti i bacini analizzati.

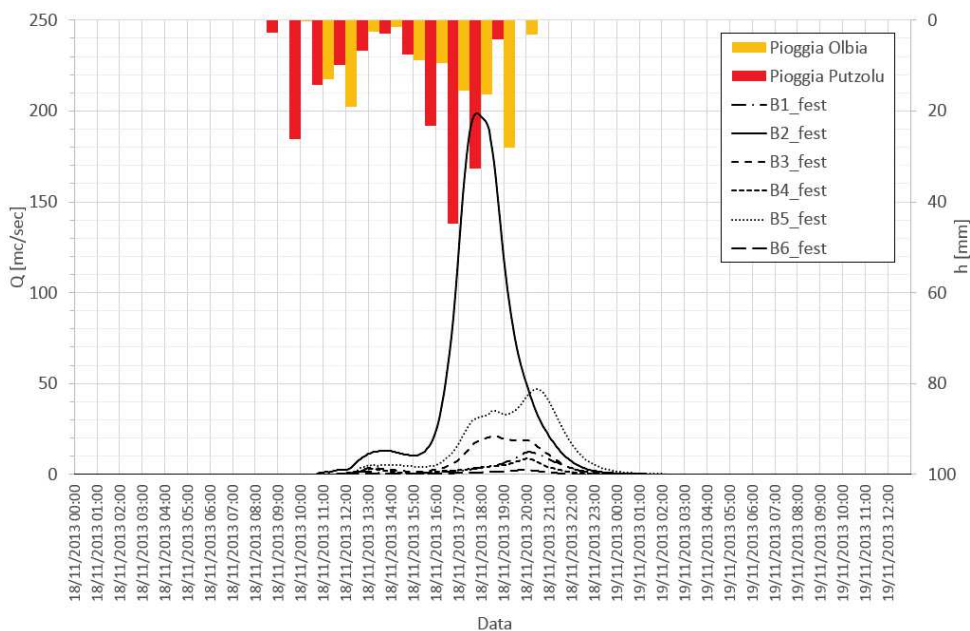


Figura 27. Ricostruzione idrologica dell'evento del 18 novembre 2013.

Dalle risultanze del modello è possibile osservare l'influenza delle maggiori precipitazioni registrate al pluviometro della stazione di Putzolu sul bacino AU_B2 sia in termini di portate che in termini di sfasamento temporale di arrivo dell'onda di piena. Tale aspetto dipende dalle caratteristiche topografiche del bacino in relazione alla posizione della stazione di Putzolu (figura seguente). I restanti bacini risultano meno estesi in direzione dell'entroterra e subiscono quindi la maggiore influenza della stazione pluviometrica di Olbia.

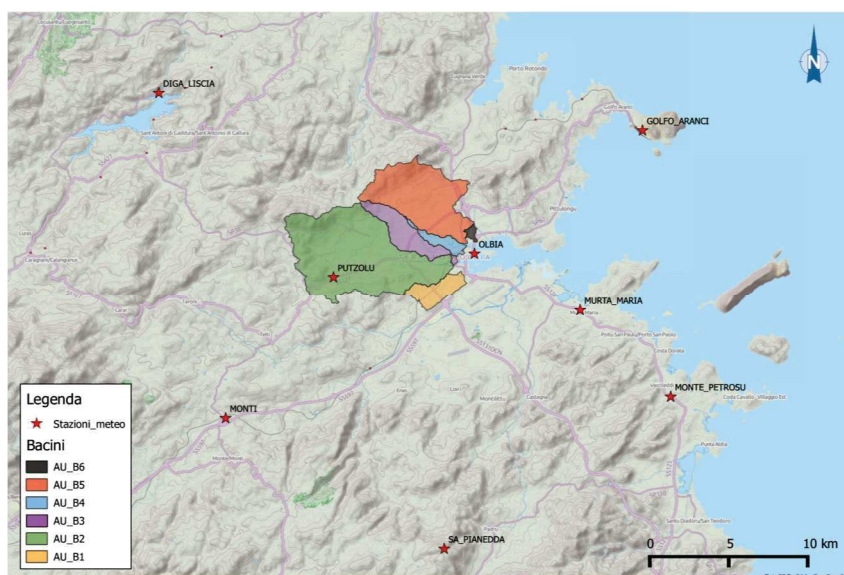


Figura 28. Bacini idrografici e stazioni pluviometriche di interesse per la ricostruzione idrologica dell'evento del 18 novembre 2013.

Vista la differenza sostanziale, in termini di portata, tra il bacino AU_B2 ed i restanti si ripropongono di seguito gli idrogrammi per i soli bacini: AU_B1, AU_B3, AU_B4, AU_B5 e AU_B6.

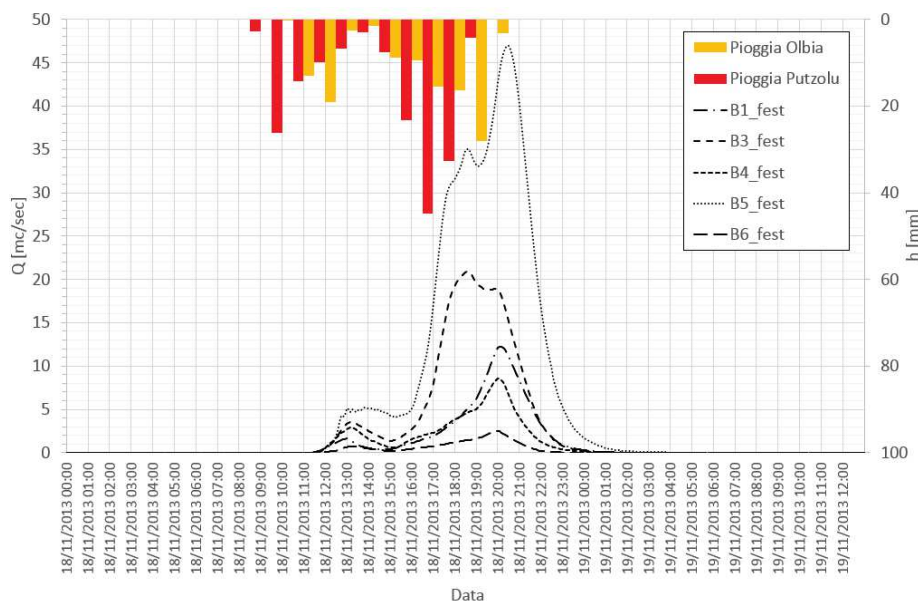


Figura 29. Idrogrammi di piena simulati per l’evento del 18 novembre 2013 tranne quello del Seligheddu.

Si riportano di seguito le portate di picco ed i volumi dell’idrogramma d’evento per ogni bacino analizzato.

Tabella 5. Portate di picco e volumi degli idrogrammi della ricostruzione dell’evento del 18 novembre 2013.

ID Bacino	AU_B1	AU_B2	AU_B3	AU_B4	AU_B5	AU_B6
Portata di picco [mc/sec]	13	200	21	9	47	3
Volume [mc]	150.000	2.130.000	330.000	120.000	760.000	35.000

3.6.1 Caratterizzazione in frequenza delle portate dell’evento del 18 novembre 2013

La caratterizzazione in frequenza delle portate dell’evento alluvionale del 18 novembre 2013 si basa sulle stime idrologiche delle portate, per i tempi di ritorno caratteristici, che sono trattate nella specifica Relazione di Analisi Idrologica (Rel. A03). Le stime in esame, di seguito riportata in forma di curve di crescita per le sezioni id foce dei bacini, si basano sull’applicazione del modello idrologico-idraulico la cui validazione è stata condotta sul confronto tra le aree allagate e i livelli censiti dal Comune di Olbia e l’insieme delle simulazioni idrologiche e idrauliche condotte. Non esistono infatti sezioni di misura delle portate per una validazione dei risultati del modello.

Viene inoltre riportata sulle curve di crescita la portata smaltibile caratteristica del reticolo dei bacini analizzati e definita nella specifica analisi sullo stato del reticolo (Rel. A01).

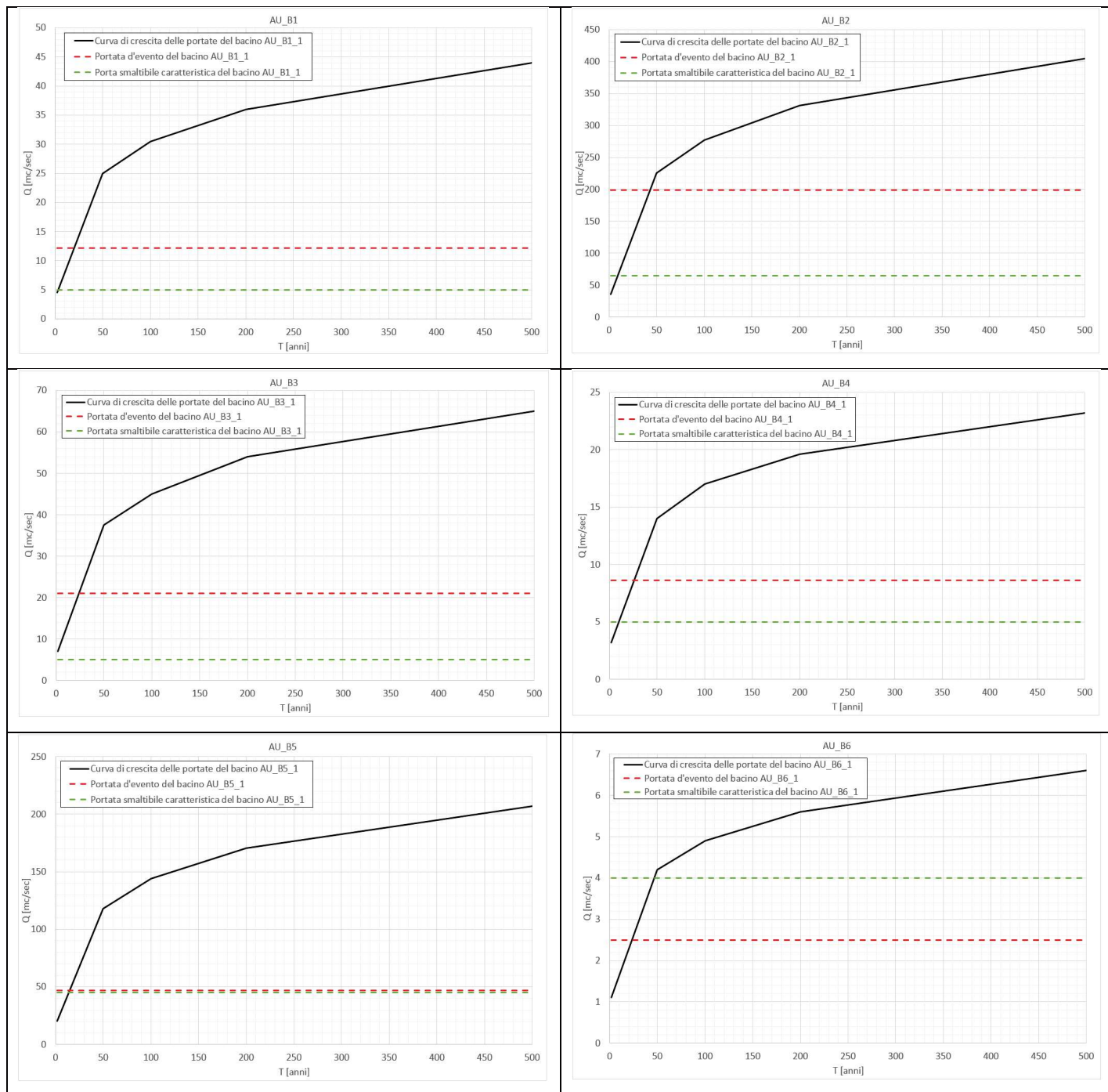


Figura 30. Caratterizzazione in frequenza delle portate dell’evento del 18 novembre 2013 (linea verde) per ogni bacino analizzato e portata smaltibile (linea rossa) caratteristica dei tratti del reticolo fluviale.

In generale si osserva che il tempo di ritorno delle portate dell’evento alluvionale del 18 novembre 2013 è stato di circa 25-30 anni per la maggior parte dei bacini fatto salvo il caso del bacino del Riu Seligheddu (AU_B2_1) il cui tempo di ritorno risulta circa cinquantennale. Come precedentemente riportato tale aspetto è da ritenersi l’effetto della distribuzione spaziale delle precipitazioni che risultano più intense in prossimità della stazione pluviometrica di Putzolu, che grava in maggior misura, rispetto alla stazione di Olbia, sul bacino del Riu Seligheddu

Per quanto riguarda il confronto delle portate d’evento con le portate caratteristiche smaltibili dal

reticolo si osserva una generale insufficienza idraulica del reticolo.

4 MODELLAZIONE IDRAULICA DELL'EVENTO DI INONDAZIONE

Nei successivi capitoli verrà trattata la ricostruzione idraulica dell'evento alluvionale del 18 novembre 2013. Tale analisi si riferisce al solo evento dovuto dalla piena dei corsi d'acqua che attraversano il centro urbano e non al fenomeno di allagamento dovuto alla crisi del sistema delle fognature bianche. Essa riceve come input gli idrogrammi di piena ricostruiti dalle simulazioni idrologiche, descritti nei capitoli precedenti, tentando di ricostruire nel modo più fedele e coerente con i processi realmente accaduti le dinamiche di allagamento che si sono manifestate durante l'evento.

La modellazione numerica dell'inondazione generata dall'evento è stata eseguita con due modelli distinti: con un modello ibrido 1D-2D e tramite una modellazione puramente bidimensionale. Tale approccio, che si è sviluppato dopo le prime analisi con solo modello ibrido 1D-2D, è stato dettato dall'analisi dinamica del processo di esondazione, che rende particolare tale studio. Infatti le analisi fatte, il confronto con l'osservazione dell'inondazione, nonché i sopralluoghi e le verifiche locali hanno evidenziato una serie di insufficienze diffuse lungo la quasi totalità del reticolo idrografico, che durante l'evento sono state poi ulteriormente aggravate da ostruzioni quasi complete dovute all'effetto di trattenimento di materiale flottante trasportato dalla corrente di piena non solo in alveo ma anche sulle aree più prossime ai corsi d'acqua.

4.1 IL MODELLO IDRAULICO DI PROPAGAZIONE

La modellistica idraulica delle aree del centro urbano del comune di Olbia è stata implementata con il software Infoworks ICM sviluppato dall'azienda inglese HR Wallingford.

Infoworks ICM è un applicativo software per la verifica e la progettazione di sistemi idraulici complessi costituiti da reti idrauliche e corsi d'acqua di tipo naturale. Il software consente di costruire e risolvere, in regime di moto vario, modelli idraulici di tipo monodimensionale (1D) che consentono di valutare la propagazione dell'onda di piena in alveo, modelli idraulici di tipo puramente bidimensionale (2D) per lo studio della propagazione dell'esondazione in aree su cui è definita una griglia di elementi triangolari sulla base topografica costituita, generalmente, da un modello digitale del terreno (DTM) e modelli idraulici combinati (1D – 2D) con la modellazione ibrida monodimensionale nel canale e bidimensionale nelle aree inondabili.

Infoworks ICM è dotato di un risolutore per il moto vario nella conformazione bidimensionale che utilizza la metodologia di calcolo dei volumi finiti.

Il modulo di calcolo 2D utilizzato dal software Infoworks ICM si basa sulle ben note equazioni

shallow water equations SWE. Le equazioni delle acque basse (shallow water), cioè la versione a profondità media delle equazioni di Navier-Stokes, sono utilizzate per la rappresentazione matematica dei flussi 2D. Le equazioni di SWE assumono che il flusso è prevalentemente orizzontale e che la variazione della velocità sulla verticale può essere trascurata.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q_{1D}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = S_{0x} - S_{fx} + q_{1D}u_{1d}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = S_{0y} - S_{fy} + q_{1D}v_{1d}$$

Dove:

- h è l'altezza d'acqua;
- u e v sono le velocità nelle direzioni x ed y ;
- S_{0x} e S_{0y} sono le perdite di carico per effetto dell'attrito nelle direzioni x ed y ;
- q_{1D} è la portata di transito per unità di superficie;
- u_{1D} e v_{1D} sono le componenti di velocità della portata di transito nelle direzioni x ed y .

La formulazione conservativa delle SWE è essenziale al fine di preservare le grandezze fondamentali di base, di massa e di quantità di moto. Questo tipo di formulazione permette la rappresentazione di discontinuità di flusso e cambiamenti tra portata gradualmente variata e rapidamente variata.

Il modulo 2D adotta una discretizzazione ai volumi finiti utilizzando elementi di controllo per rappresentare l'area di studio e utilizzando uno schema esplicito del primo ordine per la discretizzazione temporale. Con il metodo dei volumi finiti, il dominio di modellazione è diviso in forme geometriche su cui le SWE vengono integrate per poter definire equazioni in termini di flussi attraverso i confini dell'elemento di controllo.

Il modello idraulico Infoworks ICM combina la modellazione monodimensionale (1D) in alveo alla modellazione bidimensionale nelle aree inondabili adiacenti all'alveo comprese nell'area modellata con magliatura variabile triangolare (2D zone).

L'interfaccia tra alveo e zona 2D è costituita da connessioni spondali dette "bank lines". Ciascun tratto fluviale può essere collegato lateralmente ad altri tratti fluviali, a casse d'espansione (storage areas) o a zone 2D ed il flusso dal corso d'acqua può essere in uscita dall'alveo o di rientro in alveo. Il flusso attraverso le sponde è modellato analogamente allo sfioratore laterale a funzionamento libero o rigurgitato in funzione dei livelli idrici presenti in alveo e dai tiranti presenti nella zona 2D.

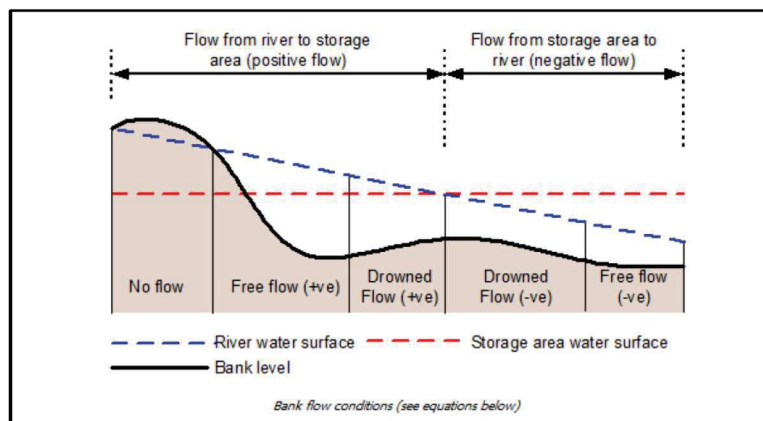


Figura 31. Schema di calcolo del flusso attraverso le linee di sponda nel modello idraulico Infoworks ICM.

L'equazione di base dello stramazzone in parete grossa implementata nel modello idraulico per il calcolo del flusso attraverso le linee di sponda è:

$$Q = C_d b h^{1.5}$$

Il termine C_d rappresenta il coefficiente di efflusso variabile da 1.7 a 1.85 (nella formulazione implementata nel modello Infowork ICM il coefficiente di deflusso è di tipo anglosassone quindi moltiplicato per il fattore $\sqrt{2g}$). Il valore del coefficiente di deflusso C_d deve essere ridotto se, anziché avere il deflusso da strutture in calcestruzzo, si ha deflusso su strutture arginali in sponde naturali. Per modellare il flusso attraverso linee di sponda di tipo naturale risulta opportuno assumere valori pari o inferiori a 1 che consentono di considerare le perdite di carico indotte dall'attrito sopra la linea spondale.

4.2 DATI UTILIZZATI

Il punto di partenza per le simulazioni oggetto di questo lavoro fa capo allo **Studio generale per l'adeguamento del piano urbanistico comunale al piano stralcio per l'assetto idrogeologico** effettuato sul Comune di Olbia e presentato nell'Ottobre 2011.

In particolare, per la definizione del modello monodimensionale del reticolo principale e secondario, si è utilizzato il rilievo delle sezioni idrauliche di ciascun corso d'acqua e delle opere idrauliche ad esso connesse integrando tali dati con le misure ed osservazioni effettuate in campo.

Il **materiale cartografico** utilizzato, fornito dal Comune di Olbia comprende:

- CT quotata in scala 1:1'000;
- rilievo LIDAR 1m x 1m datato 19/04/2010
- shape file riguardanti l'idrografia comunale;
- carta dell'uso del suolo;
- ortofoto dell'area oggetto di studio datate 06/12/2007.

Infine si è tenuto conto del **Progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF)** attualmente in vigore per il sub bacino 04 Liscia.

5 IL MODELLO DI PROPAGAZIONE IDRAULICA 1D-2D

Il modello idraulico implementato è di tipo ibrido tra modellazione monodimensionale 1D e modellazione bidimensionale 2D. Il modello di base è stato strutturato tramite modellazione monodimensionale considerando il reticolo principale e minore presente all'interno della cintura della tangenziale. Tale modello è stato successivamente innestato su di un dominio di calcolo bidimensionale che comprende l'area compresa tra la tangenziale e la costa.

5.1 LA PROPAGAZIONE MONODIMENSIONALE (1D)

La rete fluviale è stata modellata in monodimensionale sulla base dei rilievi delle sezioni idrauliche, integrate con misure in campo, presenti nello *“Studio generale per l'adeguamento del piano urbanistico comunale al piano stralcio per l'assetto idrogeologico”* e trasmesse dal Comune di Olbia (Figura seguente).

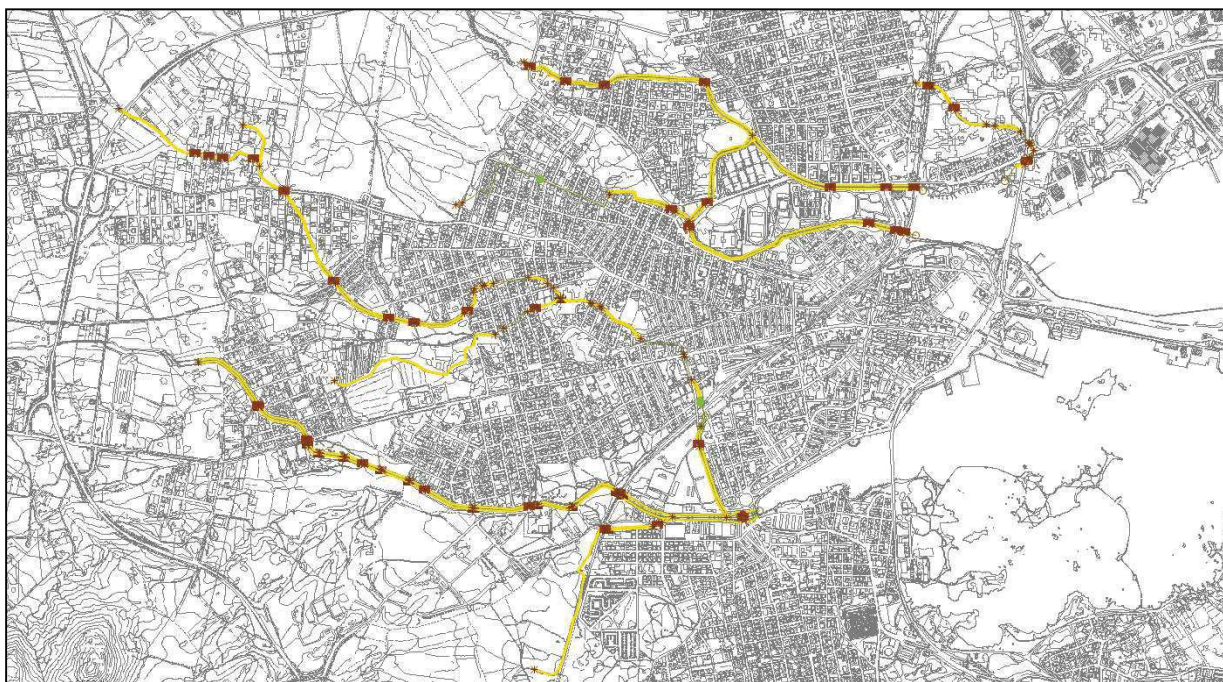


Figura 32. Reticolo idraulico implementato in 1D nel modello idraulico Infoworks ICM.

Il reticolo considerato presenta sezioni con caratteristiche naturali alternate a sezioni artificiali intervallate dalla presenza di tratti tombati e condotte di piccolo diametro sui rii minori. Il modello idraulico Infoworks ICM è particolarmente adatto a tali situazioni disponendo di elementi di calcolo idraulico tipici dei corsi d'acqua (ponti, sfiorii, salti di fondo ecc.), ma avendo a disposizione anche elementi di modellazione idraulica tipici delle reti di fognatura (condotte, pozzetti, tratti con

funzionamento in pressione, sifoni ecc.). Questo permette una rappresentazione ottimale dei sistemi idraulici complessi come quello in analisi.

5.2 LE STRUTTURE INTERFERENTI CON LA PROPAGAZIONE 1D

I corsi d’acqua oggetto di studio sono attraversati da numerosi ponti e strozzature e tratti tombati. Tali strutture sono definite all’interno del modello attraverso diversi elementi: a) l’elemento idraulico *bridge* per definire i limiti d’estradosso del ponte, b) l’elemento *bridge opening* per caratterizzare le aperture presenti nella struttura del ponte, (*Figura seguente*); c) l’elemento *conduit* per la parte tombata; d) l’elemento idraulico *weir* che modella il comportamento di una soglia e salto di fondo.

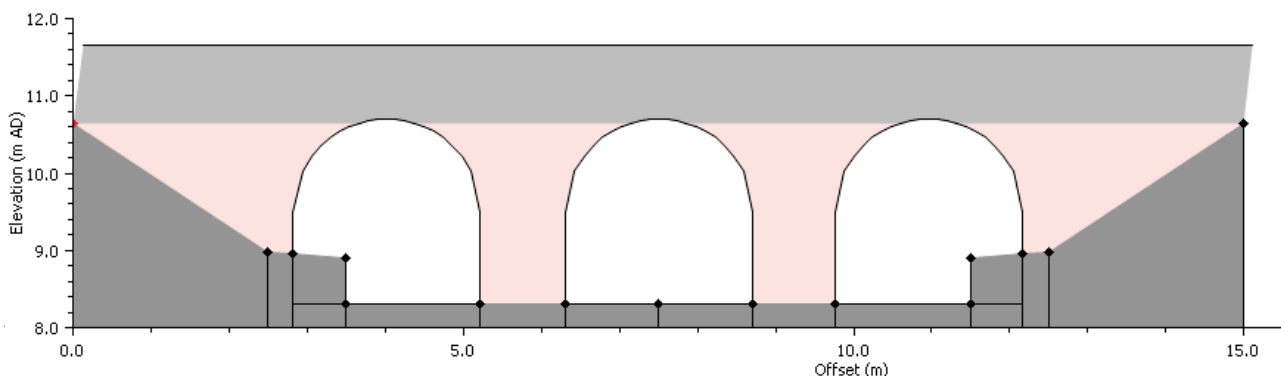






Tabella 6. Figura 1 Geometria del ponte in Via Vittorio Veneto sul Riu de Siligheddu.

5.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA SCABREZZA 1D

Per i corsi d’acqua modellati in monodimensionale i valori di scabrezza (di Strickler in $m^{1/3}/s$) idraulica adottati sono stati i seguenti:

Tabella 7. Valori del coefficiente di scabrezza di Strickler per le varie tipologie di sezione incisa presenti.

<p>Alvei naturali poco incisi con fondo in ghiaia e sponde molto vegetate. Manutenzione assente.</p> <p style="text-align: center;">$K_s = 20 \text{ m}^{1/3}/s$</p>	
<p>Canali con fondo in ghiaia e sponde vegetate. Manutenzione mediocre.</p> <p style="text-align: center;">$K_s = 30 \text{ m}^{1/3}/s$</p>	

<p>Canali con fondo in ghiaia e sponde in calcestruzzo. Manutenzione mediocre.</p> <p>$K_s = 45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$</p>	
<p>Condotti a pelo libero rivestiti in calcestruzzo di forma circolare o scatolare.</p> <p>$K_s=50$</p>	

5.4 LA PROPAGAZIONE BIDIMENSIONALE (2D)

Il dominio di calcolo bidimensionale comprende l'area del Comune di Olbia delimitata dalla circonvallazione costruita in gran parte su rilevato presente a Ovest della città. Per simulare al meglio gli effetti bidimensionali degli eventi di piena si è utilizzato il modello digitale del terreno di tipo LIDAR ad alta risoluzione (celle a risoluzione spaziale di 1m x 1m) datato 04/2010 edito dal Ministero dell'Ambiente e in dotazione al Distretto Idrografico (Figura seguente).

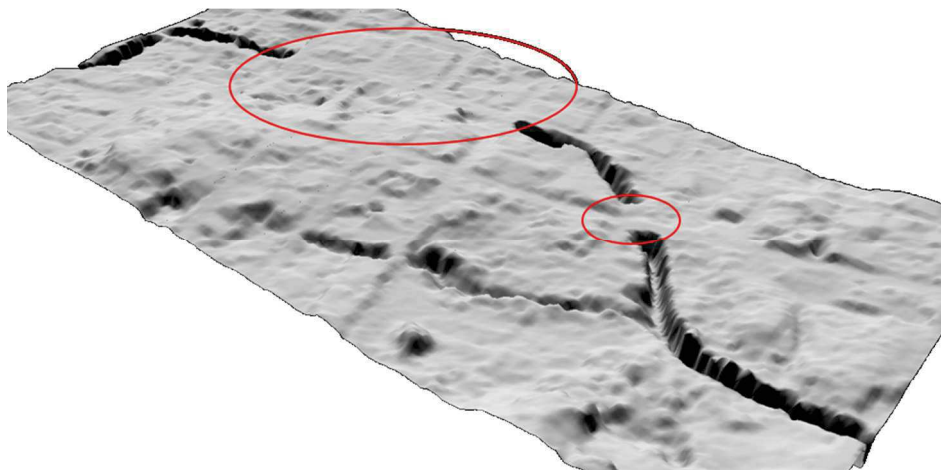


Figura 33. Stralcio del rilievo lidar in ambito urbano; si osservi l'incisione del canale e l'impossibilità, per questa tipologia di rilievo, di considerare ponti e tratti tombati (in rosso).

Utilizzando il rilievo LIDAR come base si è poi creato la geometria per il modello idraulico bidimensionale rappresentato da una maglia triangolare tramite l'oggetto *2D zone*. Per la generazione della maglia si è impostato un'area minima degli elementi triangolari di 100 m² e un'area massima di 400 m² trattandosi di un'area molto estesa. La generazione della maglia considera anche gli edifici presenti assunti dalla cartografia tecnica comunale in scala 1:1'000 per la maggior parte e anche dalle immagini satellitari di Google Earth™ (febbraio 2014).

La simulazione idraulica considera il dettaglio delle strade e degli edifici ed in particolare questi ultimi come elementi porosi (allagabili) e non impermeabili poichè si ammette che una quota parte del flusso d'acqua interessi tali zone.

Questo è stato realizzato mediante l'utilizzo di elementi specifici *porous polygons* impostando il valore di porosità a 0.2 (ovvero il 20% del flusso che interessa l'edificio interagisce con esso). Tale valore deriva dalla calibrazione effettuata sull'estensione dell'evento di allagamento censito dal Comune di Olbia.

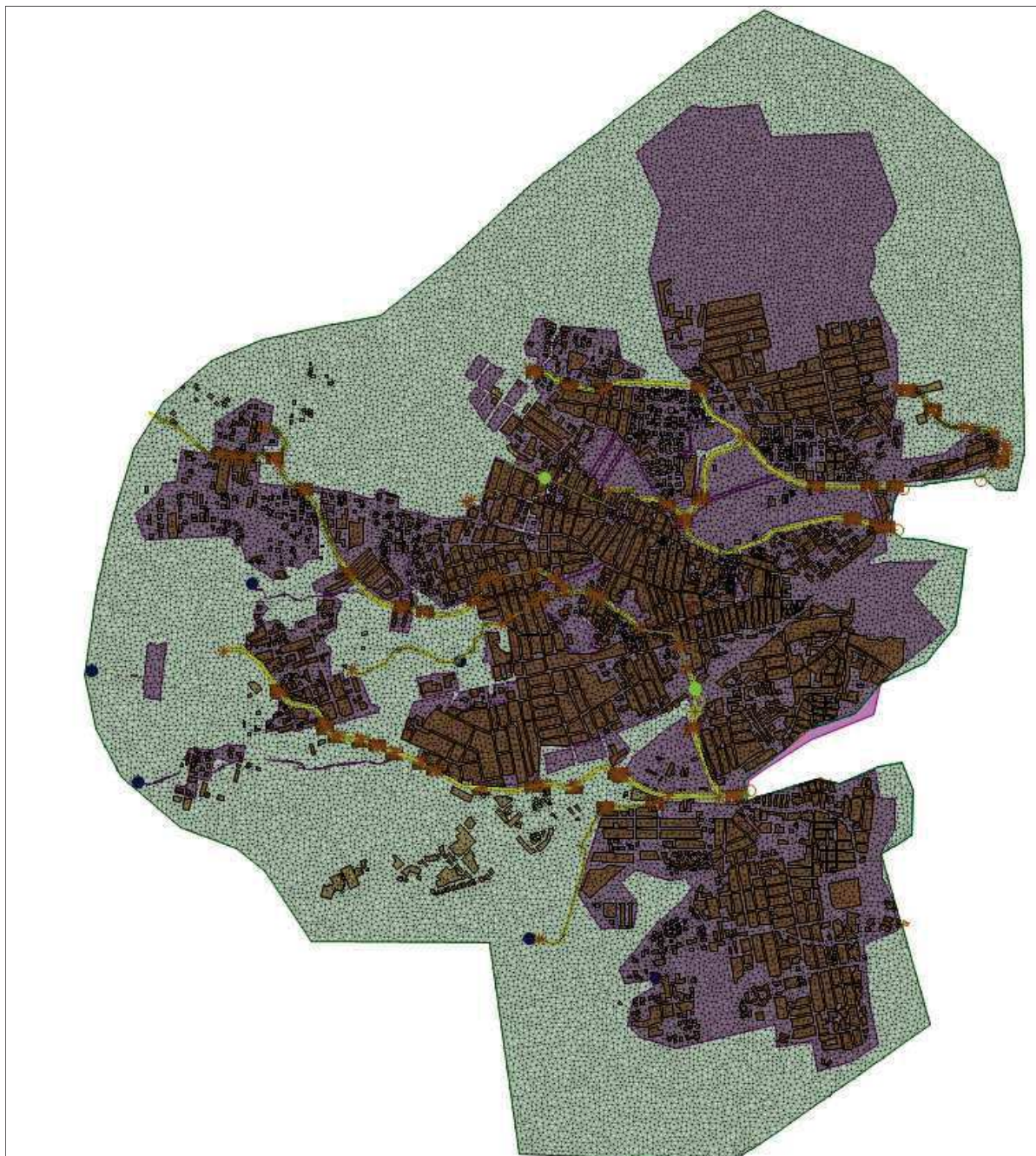


Figura 34. Modello idraulico ibrido mono-bidimensionale: in verde il dominio di calcolo, in giallo il dominio monodimensionale costituito dai corsi d'acqua e dalle opere idrauliche, in marrone gli edifici, in violetto le zone a differente scabrezza.

5.4.1 Caratterizzazione della scabrezza della piana alluvionale (2D)

Nelle aree esterne ai corsi d'acqua, ossia nella piana alluvionale modellata con la componente bidimensionale del modello numerico sono stati utilizzati i seguenti valori di scabrezza :

- $K_s=40$ strade e aree densamente urbanizzate
- $K_s=25$ abitati sparsi fuori dal centro urbano
- $K_s=10$ aree verdi, parchi, giardini
- $K_s=5$ aree alberate
- $K_s=10$ il restante dominio di calcolo

che sono poi visualizzati sul dominio di calcolo (Figura seguente).

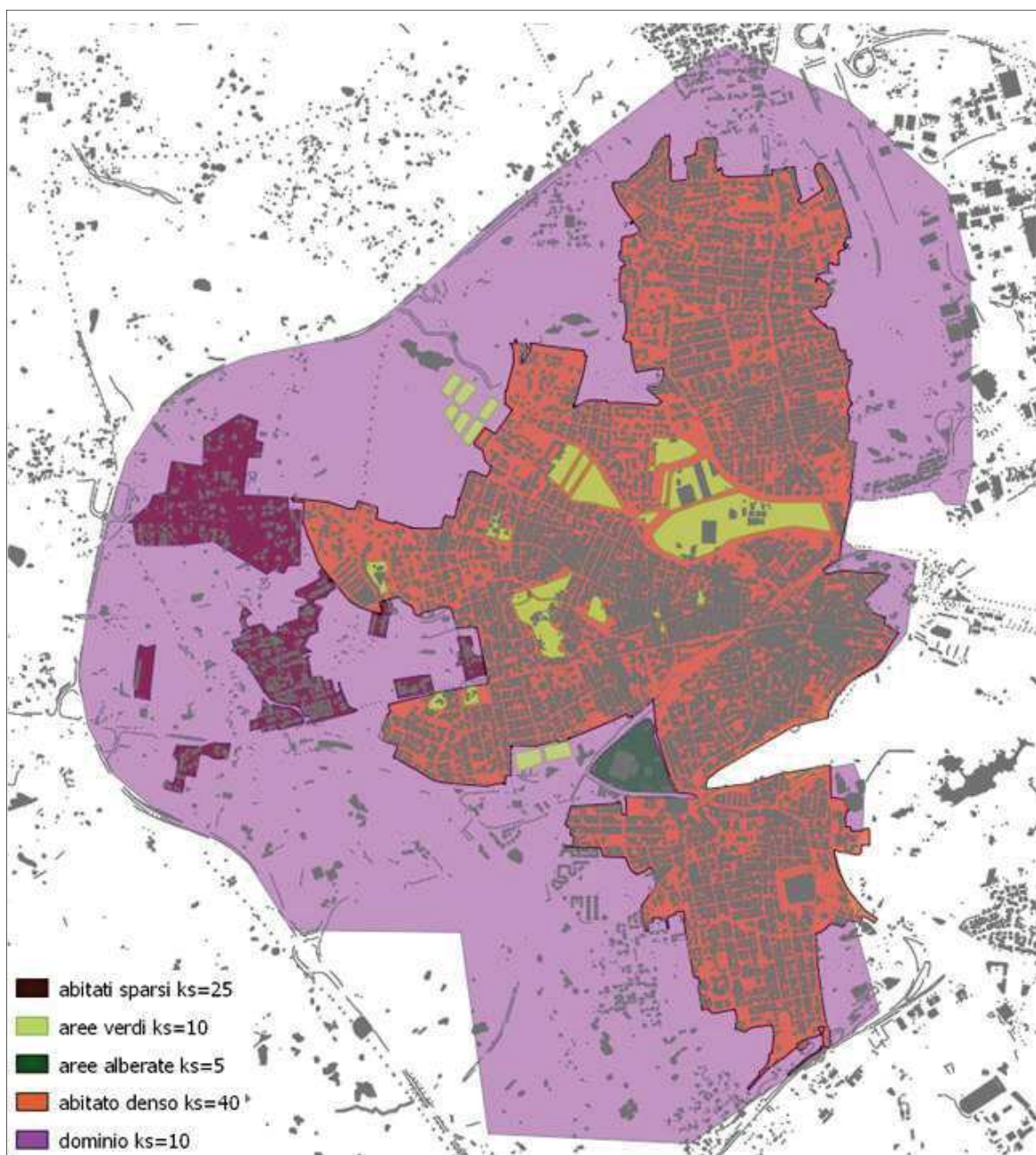


Figura 35. Mappa delle diverse scabrezze idrauliche adottate nel modello.

5.5 CONDIZIONI AL CONTORNO

Il modello idraulico di tipo ibrido per la ricostruzione dell'evento alluvionale del 18 novembre 2013 ha ricevuto come ingresso gli idrogrammi calcolati per i corsi d'acqua dalla simulazione idrologica dell'evento stesso. Il modello idrologico restituisce infatti gli idrogrammi nelle sezioni di interesse che definiscono le condizioni al contorno di monte imposte nella successiva modellazione idraulica.

5.5.1 Condizioni al contorno di monte

Gli idrogrammi idrologici, per la ricostruzione dell'evento, sono stati calcolati alla sezione di inserimento del modello idraulico di cui costituiscono la condizione al contorno di monte (Figura seguente). Alcuni idrogrammi sono immessi direttamente nel dominio 2D a causa dell'assenza di un vero e proprio reticolo idraulico inciso nel tratto di immissione.

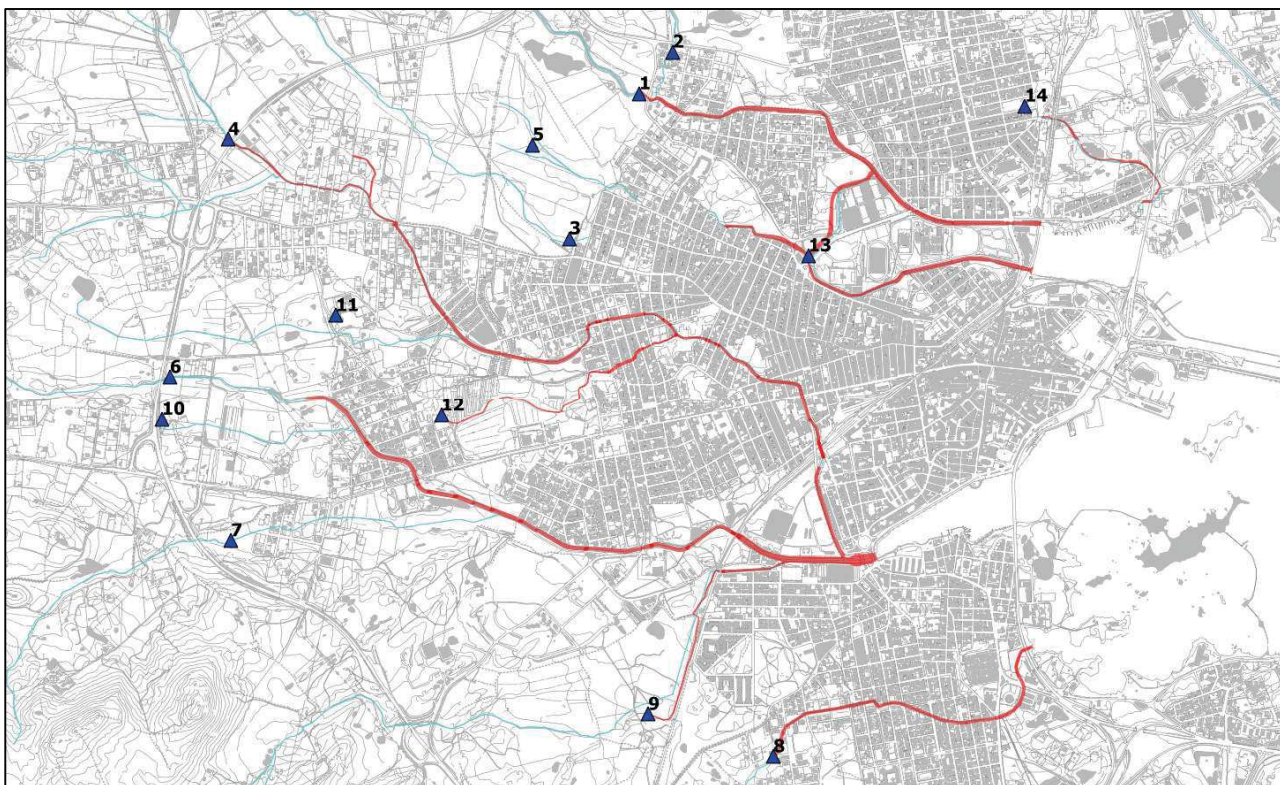


Figura 36. Punti di immissione degli idrogrammi calcolati tramite il modello idrologico di ricostruzione dell'evento del 18 novembre 2013.

Gli idrogrammi immessi sono di seguito riportati. L'immissione nel nodo 6 caratteristica dell'asta principale del Riu Seligheddu viene riportata a parte poiché rappresenta il maggior contributo, in termini di volumi e portata, che si è manifestato durante l'evento del 18 novembre 2013.

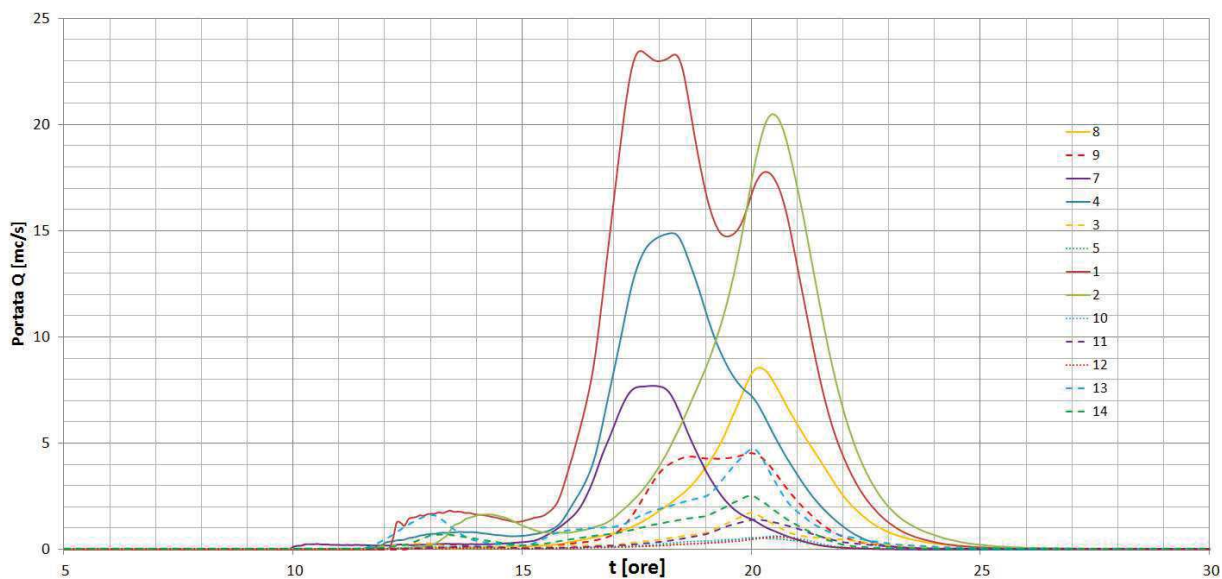


Figura 37. Idrogrammi del modello idrologico di ricostruzione evento immessi nei differenti nodi della modellazione idraulica ibrida 1D+2D. Il tempo di inizio corrisponde all’inizio del giorno 18 novembre e precisamente alle 00:00:00.

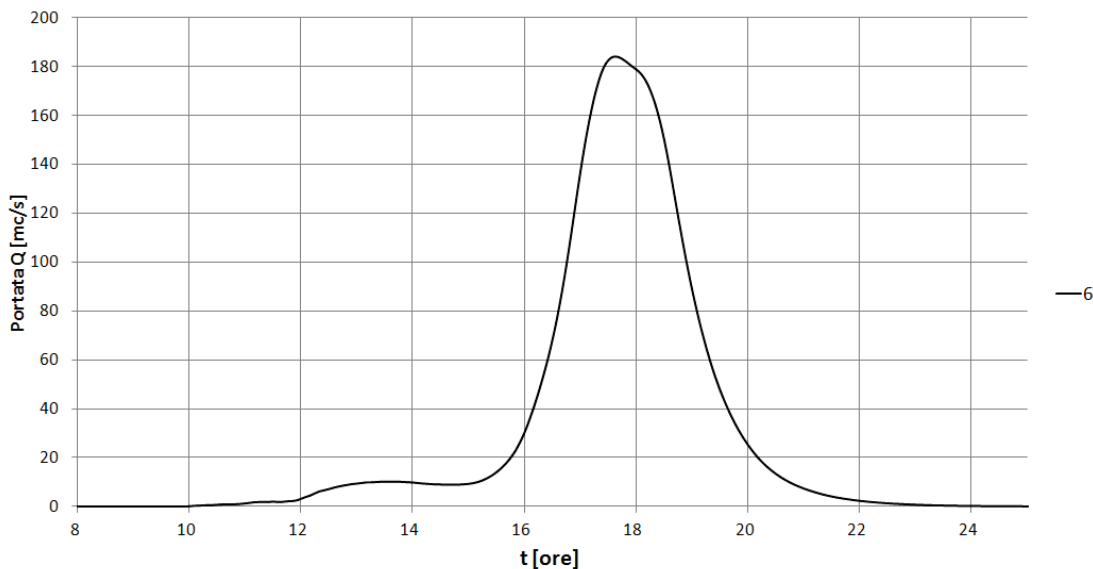


Figura 38. Idrogramma del modello idrologico di ricostruzione evento immesso nel nodo 6 e rappresentativo dell’asta principale del Riu Seligheddu. Il tempo di inizio corrisponde all’inizio del giorno 18 novembre e precisamente alle 00:00:00.

5.5.2 Condizione al contorno di valle

La condizione al contorno di valle si è posta lungo la linea di costa del dominio 2D e nei nodi terminali del reticolo 1D. Tale condizione per i corsi d’acqua in esame che sfociano nella laguna è stata fissata in un incremento della quota media del mare pari alla somma dell’altezza di marea e del sopralzo di tempesta.

$$\Delta h_v = h_{marea} + h_{sovralzotempesta} = 1 \text{ mslm}$$

Tale valore risulta anche da testimonianze durante l’evento.

5.6 SIMULAZIONE DELL'EVENTO IDRAULICA IBRIDA 1D + 2D

Di seguito si riportano le aree allagate dall'evento ricostruite attraverso l'utilizzo del modello idraulico ibrido 1D + 2D descritto in precedenza. Tali aree sono poste a confronto con le aree allagate rilevate.

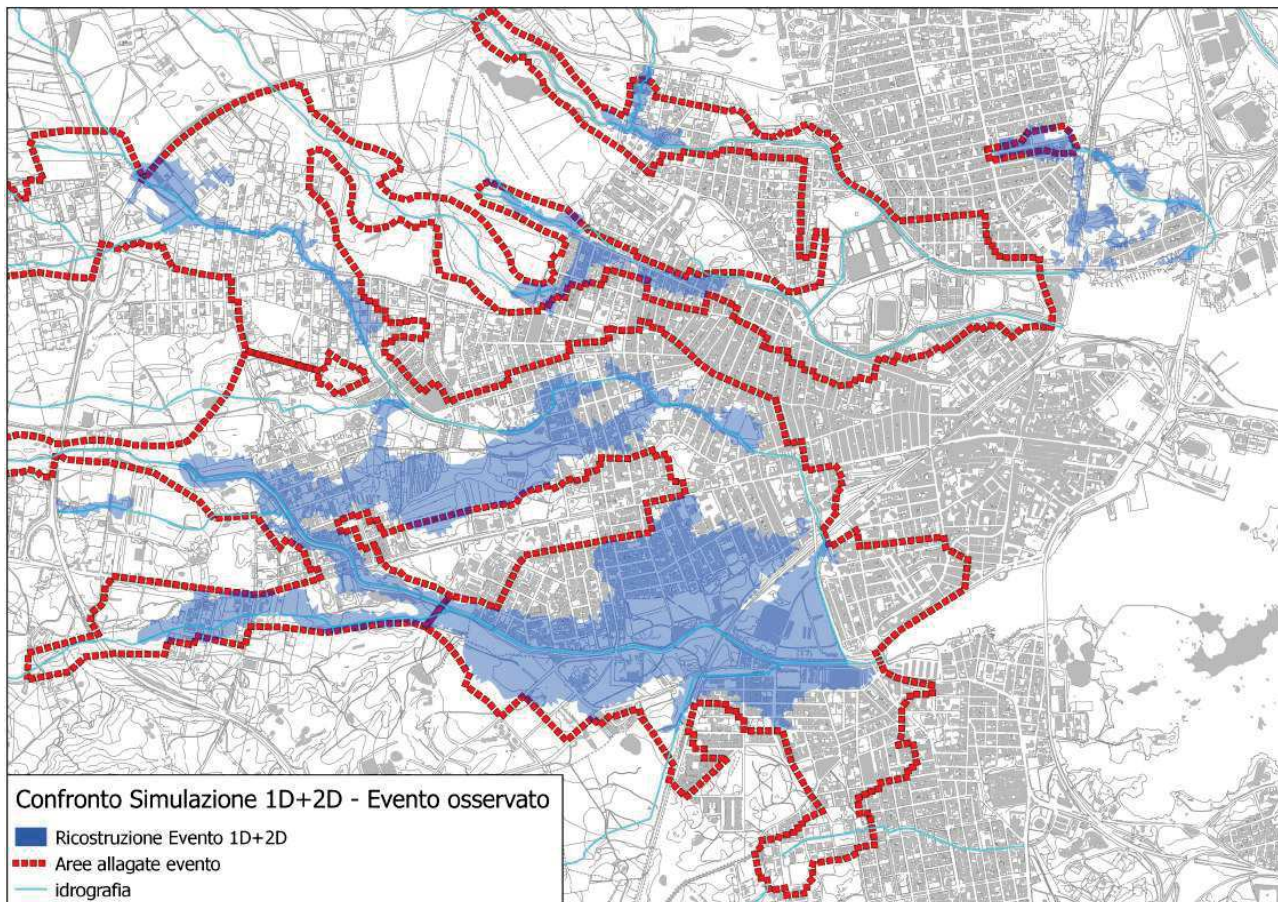


Figura 39. Aree allagate dell'evento ricostruite attraverso la modellazione idraulica ibrida 1D+2D.

Si osserva in generale una ricostruzione delle aree interessate da allagamenti con abbondanti sottostime delle stesse in alcune aree. La modellazione ibrida 1D + 2D considera il reticolo inciso, modellato in monodimensionale, completamente operativo e funzionante in modo ottimale ovvero libero da ingombri temporanei e permanenti, ostruzioni, otturazioni e malfunzionamenti in generale. Tale ipotesi di buon funzionamento del reticolo risulta essere stata non veritiera durante l'evento alluvionale e quindi non rappresentativa dei processi di propagazione realmente accaduti. È noto infatti che durante l'evento si sono manifestate situazioni di ingombri e otturazioni in modo diffuso. La più evidente è stata quella che si è verificata in prossimità della rotonda di Via Umbria sull'asta principale del Riu Gadduresu.



Figura 40. Otturazione nei pressi della rotonda di Via Umbria. Si può notare l’ostruzione avvenuta durante l’alluvione del Novembre 2013 (Fonte Olbianova.it).

L’intero reticolo è caratterizzato da situazioni, come le seguenti, che difficilmente assicurano un’adeguata capacità di smaltimento durante gli eventi di piena. Le particolari condizioni delle strutture evidenziano una propensione all’otturazione per effetto del materiale di trasporto flottante e non, sempre abbondantemente presente durante gli eventi di piena.



Figura 41. Ponte di Via Veneto (SS127) Riu Seligheddu - L’impalcato è posto all’interno della sezione, con tre luci ad arco di facile ostruzione. Vista da monte verso valle.



Figura 42. Ponte di via Tre Venezie Riu Seligheddu - Si nota l'attraversamento dei sottoservizi che agevola l'ostruzione della luce. Vista da valle verso monte.



Figura 43. Attraversamenti dei sottoservizi nei pressi della foce tra Riu Siligheddu e Riu Tannaule.



Figura 44. Attraversamento in Via T. Edison – Riu Gadduresu.



Figura 48. Attraversamento ferroviario in prossimità della foce del Riu San Nicola.

Per quanto appena riportato risulta necessario ridurre la capacità di smaltimento del reticolo idraulico presente rispetto alle condizioni ottimali modellate nella ricostruzione d'evento ibrida 1D + 2D. L'approccio è stato quello di ridurre in modo diffuso la capacità di smaltimento modellando anche il reticolo idraulico inciso tramite un dominio 2D seppur con maglie di maggior dettaglio. Questo comporta una riduzione diffusa della dimensione delle sezioni idrauliche ed in alcuni casi, come per i tratti tombati e per gli attraversamenti, la presenza di vere e proprie ostruzioni.

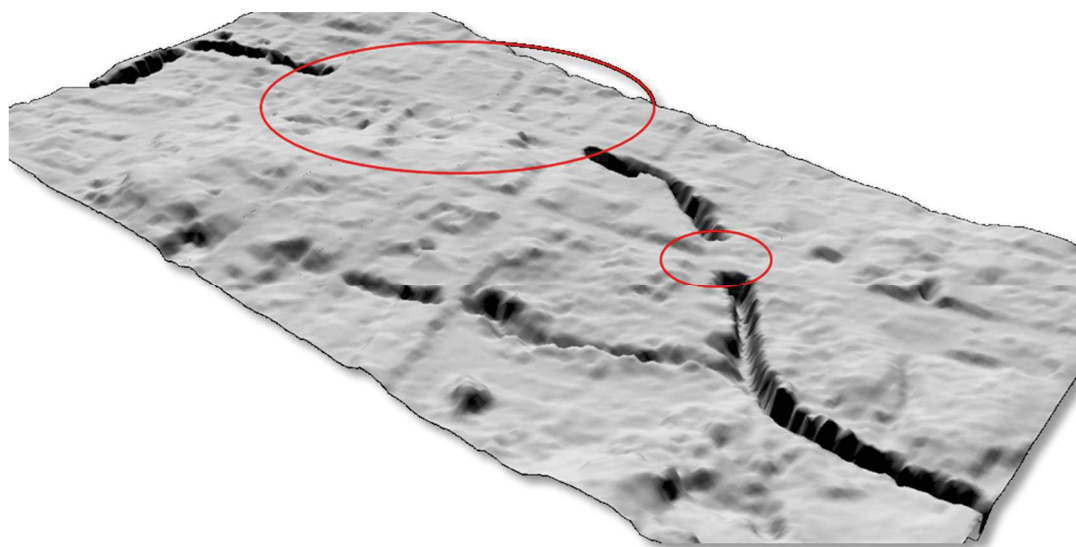


Figura 49. Stralcio del rilievo lidar in ambito urbano; si osservi l'incisione del canale e l'impossibilità, per questa tipologia di rilievo, di considerare ponti e tratti tombati (in rosso).

6 IL MODELLO IDRAULICO PURAMENTE BIDIMENSIONALE 2D

La simulazione in ipotesi di reticolo idrografico poco funzionante per la serie di ostruzioni diffuse discusse precedentemente è ottenuta attraverso l'uso del modello idraulico puramente bidimensionale, ossia senza la presenza del reticolo alveato funzionante.

Il dominio di calcolo del modello idraulico di simulazione dell'evento (Figura seguente),

comprende l'area del comune di Olbia delimitata dalla cintura della tangenziale della città.



Figura 50. Dominio di calcolo del modello idraulico di ricostruzione evento bidimensionale 2D.

Per simulare al meglio gli effetti bidimensionali degli eventi di piena si è utilizzato, come supporto topografico, un modello digitale del terreno di tipo LIDAR ad alta risoluzione (celle con risoluzione spaziale di 1m x 1m) datato Aprile 2010.

6.1 GEOMETRIA DEL MODELLO

Utilizzando il rilievo LIDAR come base topografica si è poi creato il modello idraulico bidimensionale rappresentato da una maglia triangolare variabile tramite l'oggetto *2D zone*.



Figura 51. Estratto del modello idraulico bidimensionale nei pressi del deviatore Zozò.

Per la generazione della maglia si è impostato un'area minima di 100 m² e un'area massima di 400 m² per elemento trattandosi di un'area molto estesa. Per le zone in prossimità dei corsi d'acqua si è adottata una mesh più fitta con area massima di 100 m² e area minima di 25 m² (area in blu in figura). La generazione della maglia comprende anche gli edifici (elementi in marrone) importati per gran parte dalla CT Comunale 1:1'000 e dalle immagini satellitari di Google Earth™. In particolare, nelle simulazioni si sono considerati gli edifici come elementi porosi (allagabili) e non impermeabili perché si ammette che una quota parte del flusso interessa tali zone. Questo è stato realizzato mediante l'utilizzo dell'elemento *porous polygons* impostando il valore di porosità a 0.2 (ovvero il 20% del flusso che interessa l'edificio interagisce con esso).

6.2 CARATTERIZZAZIONE DELLE SCABREZZE

Sull'intero dominio di calcolo sono state individuate, attraverso la carta d'uso del suolo e le ortofoto, delle aree che per caratteristiche risultano omogenee in termini di scabrezza idraulica. Tale suddivisione (Figura seguente) è definita sul dominio di calcolo ipotizzando le aree omogenee suddivise in:

- Ks=40 strade e aree densamente urbanizzate
- Ks=25 abitati sparsi fuori dal centro urbano
- Ks=10 aree verdi, parchi, giardini
- Ks=5 aree alberate

- $K_s=10$ il restante dominio di calcolo
- $K_s=30$ canali con caratteristiche assimilabili al naturale
- $K_s=45$ canali rivestiti in calcestruzzo con presenza di vegetazione attecchita sul materiale di deposito.

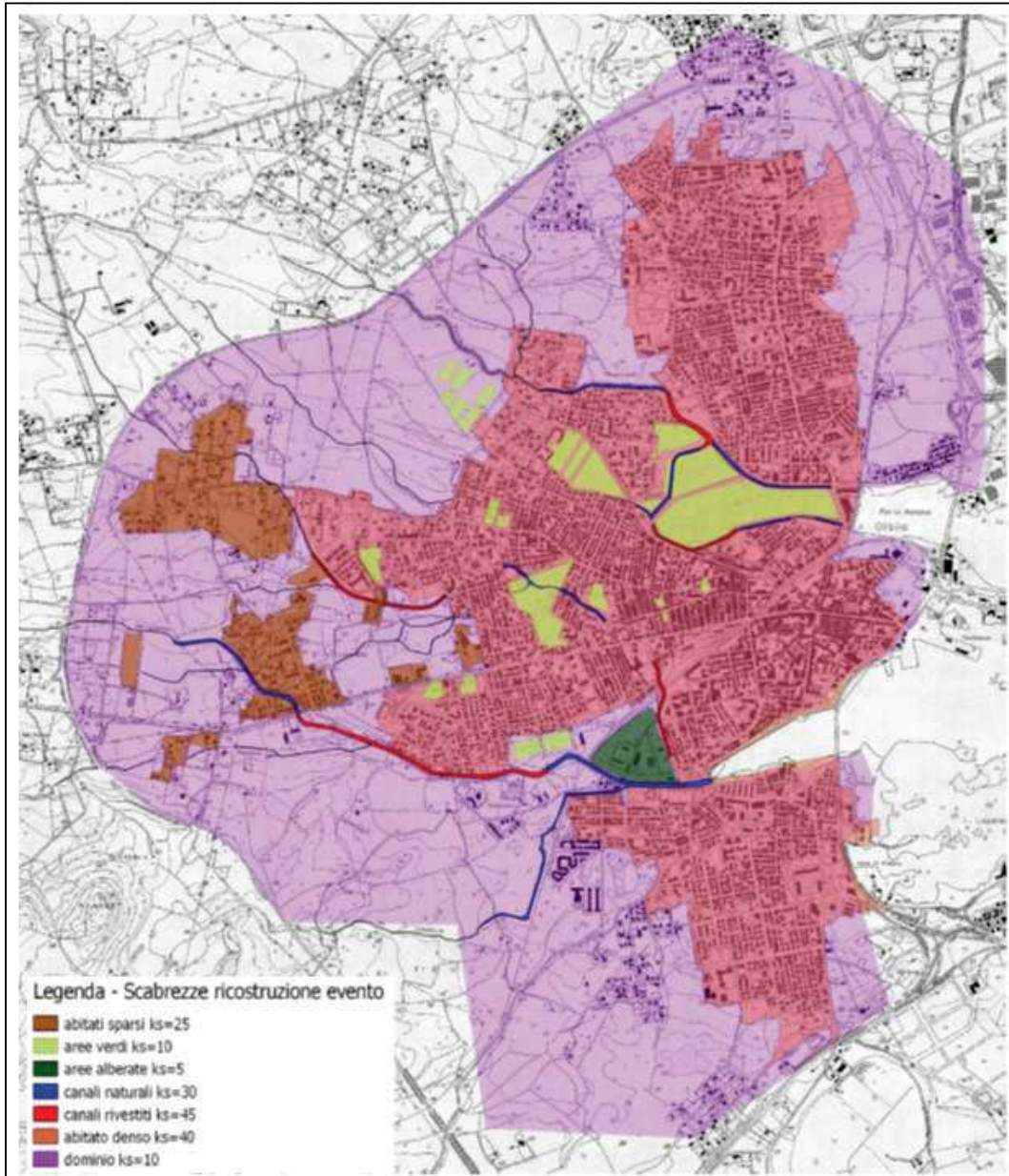


Figura 52. Modello bidimensionale: parametro della scabrezza idraulica.

6.3 CONDIZIONI AL CONTORNO DI MONTE

Di seguito si riportano i punti di immissione degli idrogrammi calcolati, nella medesima posizione, attraverso il modello idrologico di ricostruzione dell'evento.

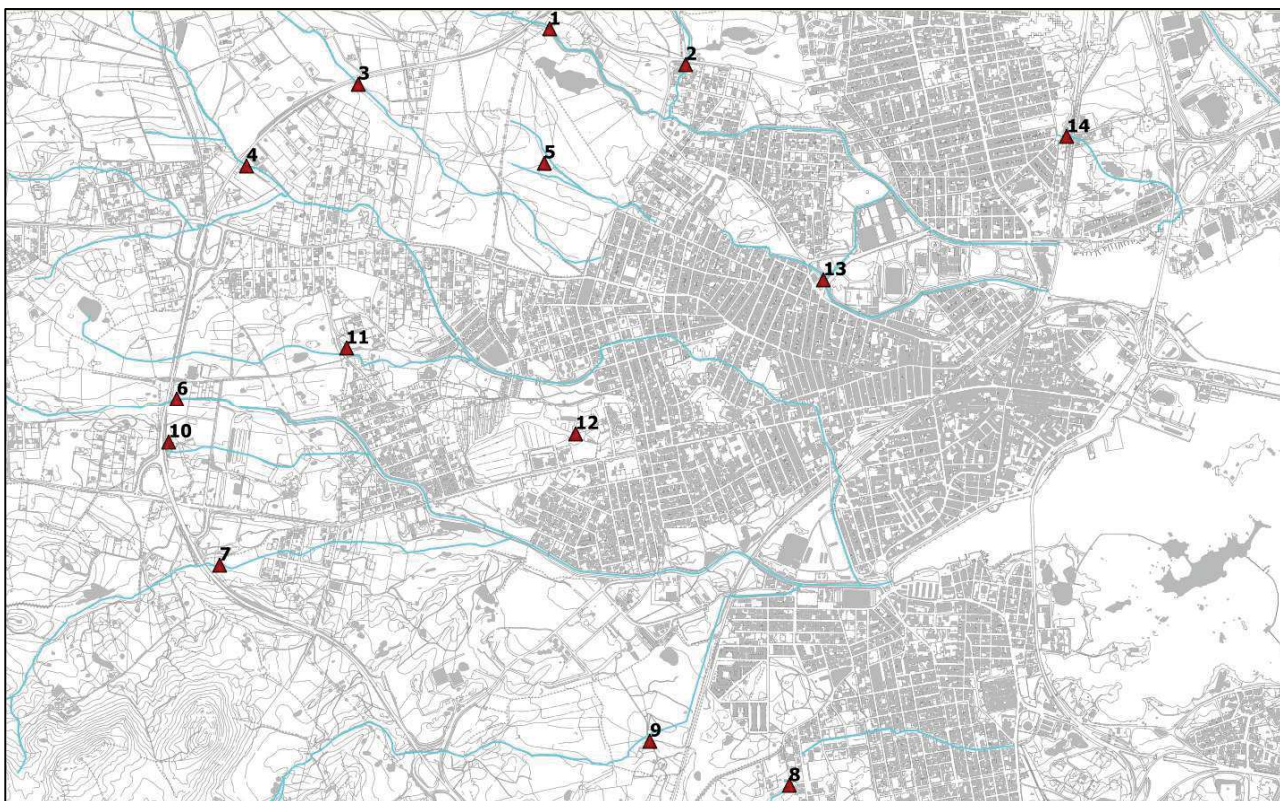


Figura 53. Punti di immissione degli idrogrammi calcolati tramite il modello idrologico di ricostruzione dell’evento del 18 novembre 2013.

Gli idrogrammi immessi sono di seguito riportati. L’immissione nel nodo 6 caratteristica dell’asta principale del Riu Seligheddu viene riportata a parte poiché rappresenta il maggior contributo, in termini di volumi e portata, che si è manifestato durante l’evento del 18 novembre 2013.

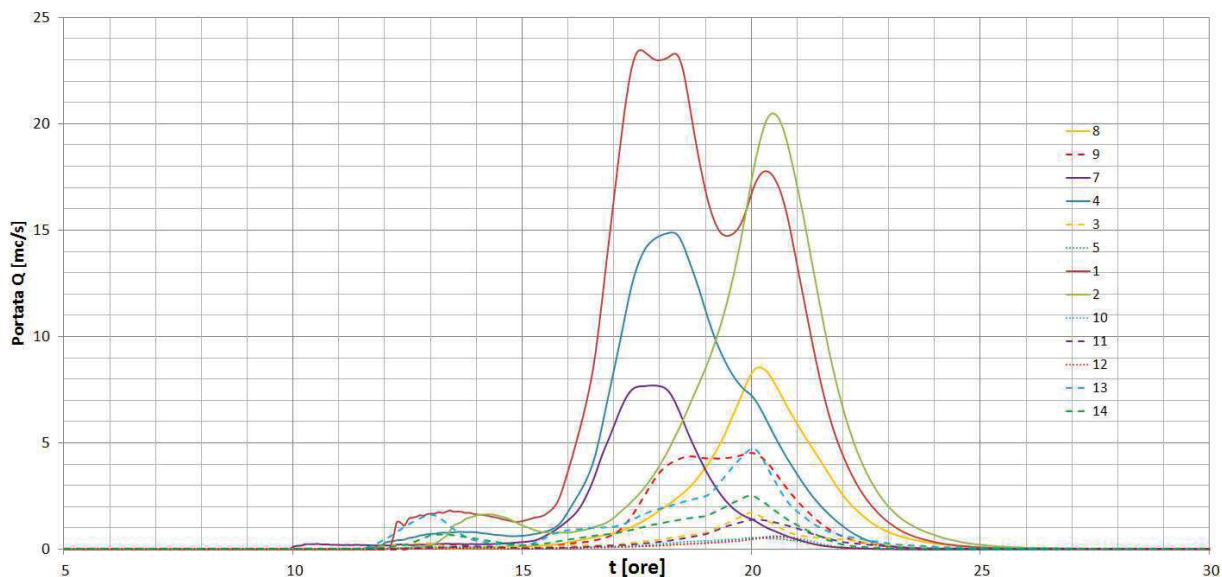


Figura 54. Idrogrammi del modello idrologico di ricostruzione evento immessi nei differenti punti di immissione della modellazione idraulica bidimensionale 2D. Il tempo di inizio corrisponde all’inizio del giorno 18 novembre e precisamente alle 00:00:00.

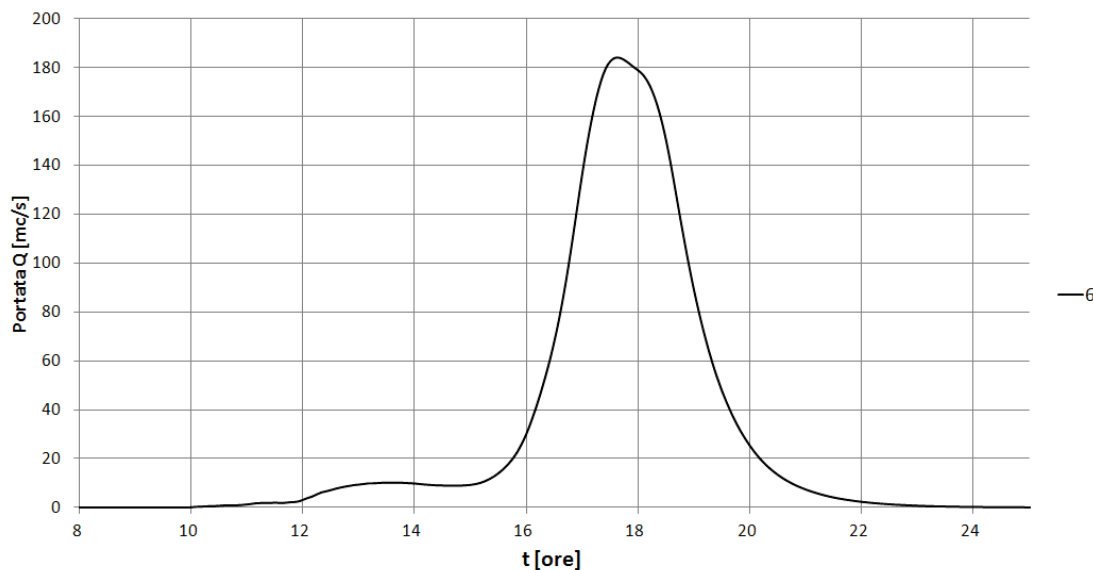


Figura 55. Idrogramma del modello idrologico di ricostruzione evento immesso nel nodo 6 e rappresentativo dell'asta principale del Riu Seligheddu. Il tempo di inizio corrisponde all'inizio del giorno 18 novembre e precisamente alle 00:00:00.

6.4 CONDIZIONE DI VALLE

La condizione al contorno di valle si è posta lungo la linea di costa del dominio 2D. Tale condizione per i corsi d'acqua in esame che sfociano nella laguna è stata fissata in un incremento della quota media del mare pari alla somma dell'altezza di marea e del sopralzo di tempesta.

$$\Delta h_v = h_{marea} + h_{sovralzotempesta} = 1 \text{ mslm}$$

Tale valore risulta anche da testimonianze durante l'evento.

6.5 RICOSTRUZIONE IDRAULICA BIDIMENSIONALE DELL'EVENTO

Di seguito si riportano le aree allagate dall'evento ricostruite attraverso l'utilizzo del modello idraulico ibrido bidimensionale 2D descritto in precedenza. Tali aree sono poste a confronto con le aree allagate rilevate.

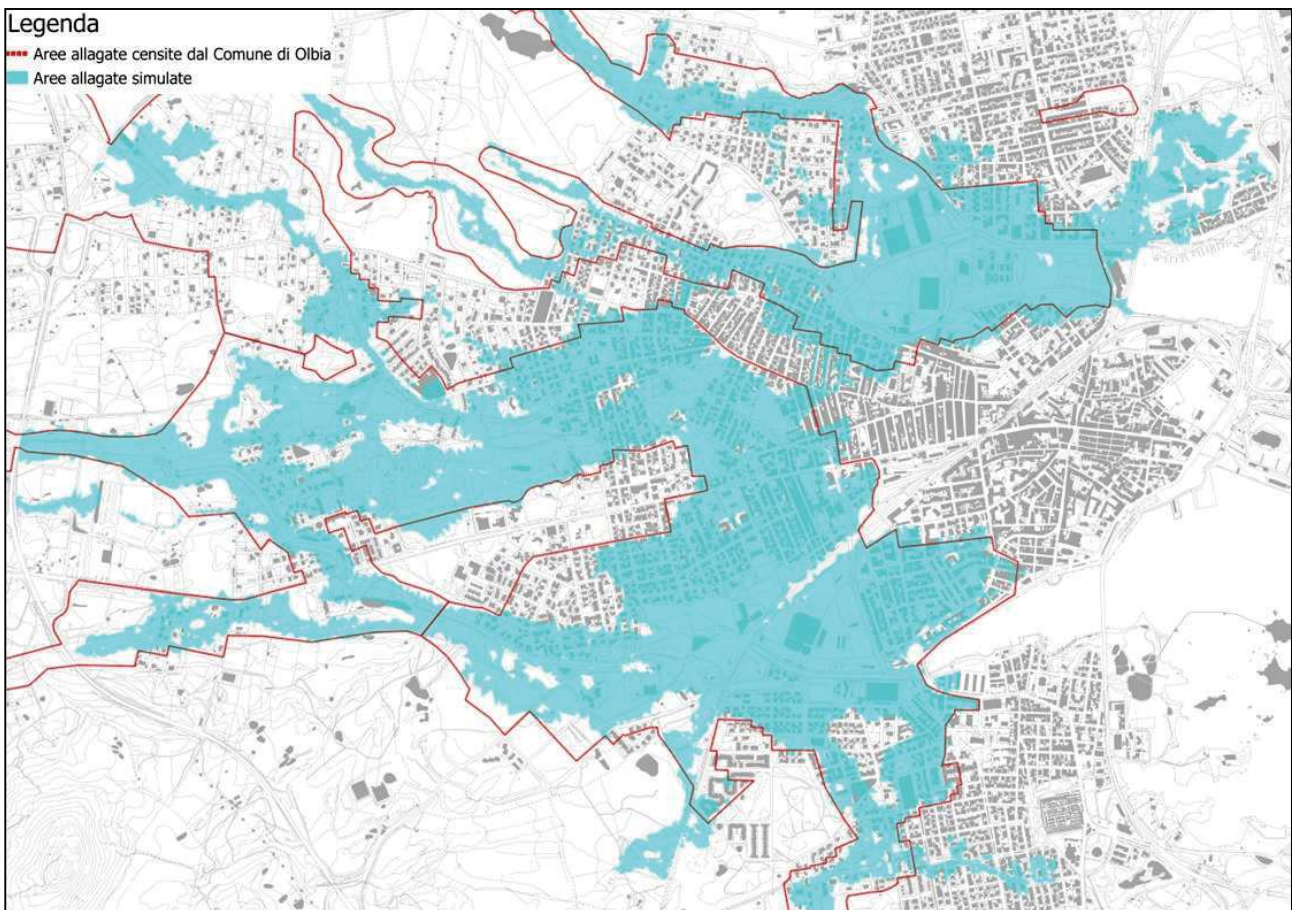


Figura 56. Aree allagate dell'evento ricostruite attraverso la modellazione idraulica bidimensionale 2D. Complessivamente si osserva una buona ricostruzione dell'evento alluvionale considerando anche il fatto che, per sua natura, il modello idraulico strutturato non considera le acque che causano allagamenti per effetto del rigurgito della rete di drenaggio urbana. Ulteriori osservazioni possono essere effettuate sulla base dell'involuppo dei massimi tiranti e delle massime velocità modellate che il modello è in grado di restituire per ogni elemento del dominio di calcolo. In particolare per quanto riguarda le velocità si osserva il fenomeno di "travaso" di portata tra il Riu Seligheddu ed il Riu Gadduresu (in nero in figura); fenomeno riscontrato anche durante l'evento reale del 18 novembre 2013.

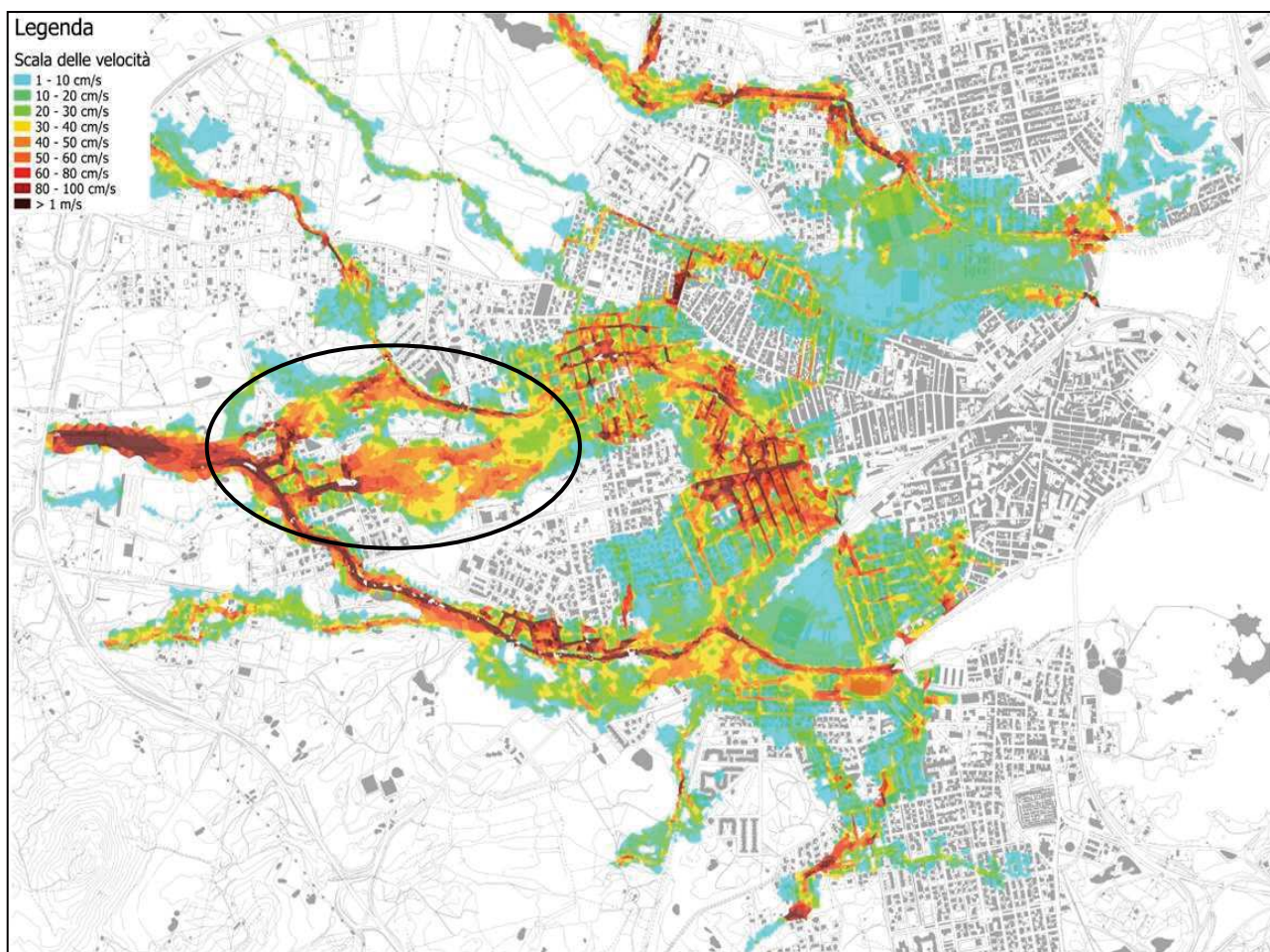


Figura 57. Inviluppo delle massime velocità da simulazione idraulica 2D. Si osservi l'area di "travaso" di portata tra il Riu Seligheddu e il Riu Gadduresu.

Come precedentemente riportato sono disponibili, a seguito della procedura di censimento danni, i livelli che si sono manifestati all'interno di abitazioni e strutture. Il complesso dei dati disponibili permette di avere quindi la definizione planimetrica delle aree allagate e seppur in modo approssimato, dei tiranti idrici massimi che si sono registrati durante l'evento. Tali dati osservati sono di seguito posti a confronto con i valori di tirante simulati (inviluppo dei massimi tiranti). Un primo confronto viene fatto in modo grafico classificando le altezze osservate e modellate tramite la stessa scala cromatica (Tav. 03.b). Un secondo confronto è stato effettuato in termini numerici confrontando i valori puntuali osservati e modellati. Tale confronto viene effettuato graficando i tiranti osservati e modellati su assi differenti dove la retta bisettrice indica la perfetta corrispondenza dei valori.

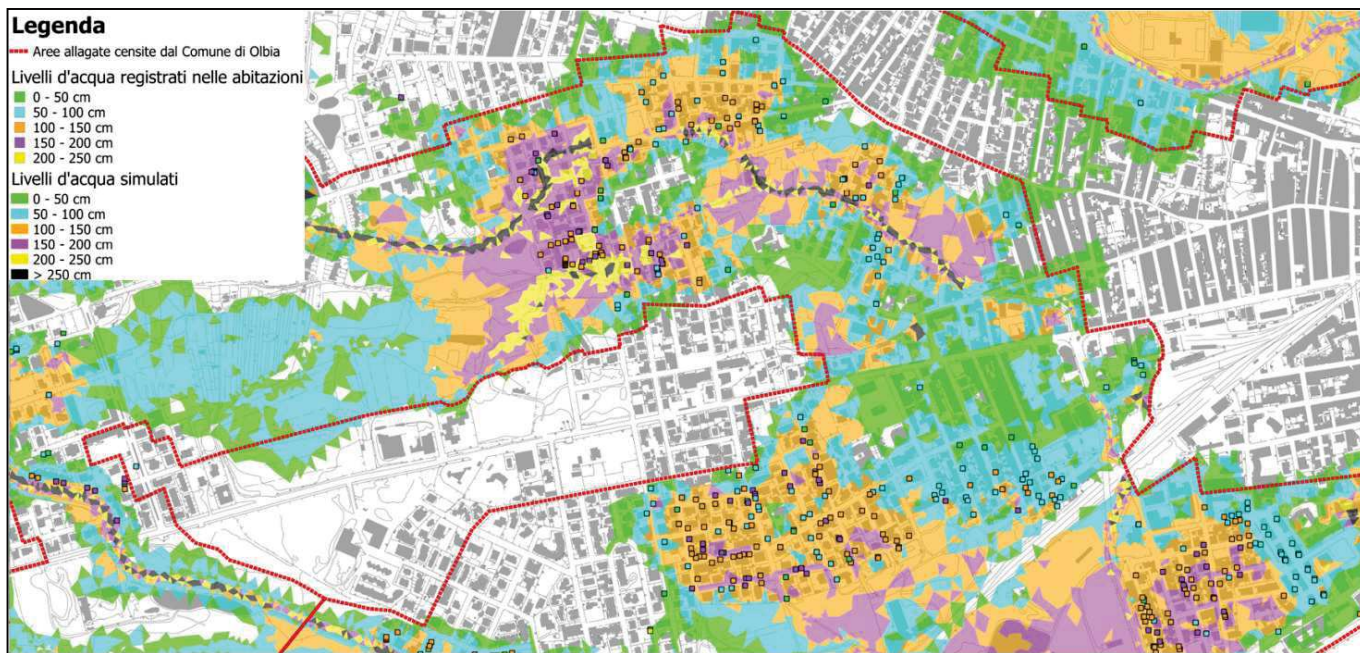


Figura 58. Confronto tra livelli osservati (punti) e livelli modellati tramite il modello idraulico di ricostruzione evento bidimensionale (Tav. 03.b).

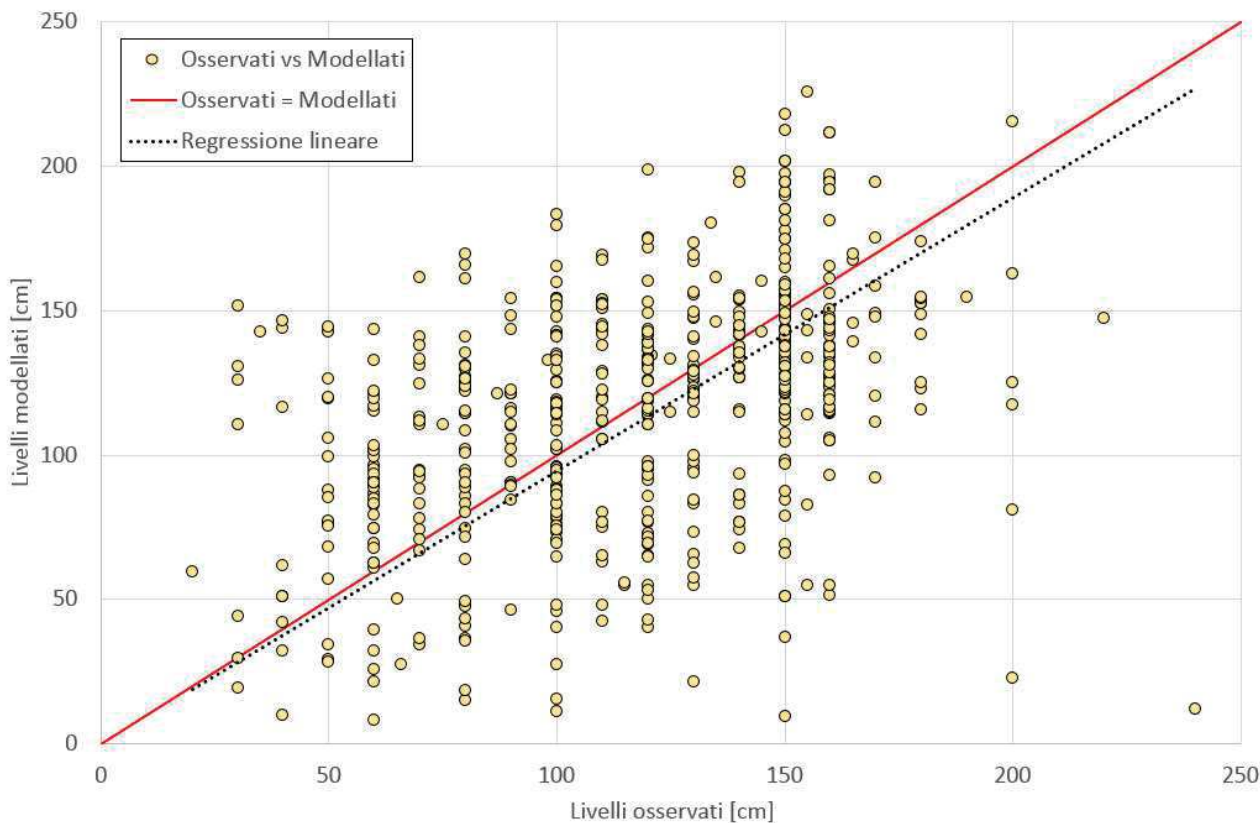


Figura 59. Confronto puntuale tra valori osservati e valori modellati.

Il confronto sopra riportato tra tiranti osservati e tiranti modellati mostra una buona corrispondenza tra i valori analizzati. Questo considerando anche il fatto che i valori di tirante misurati in fase successiva all'evento sono quelli che si sono manifestati all'interno delle abitazioni interessate. I tiranti modellati sono invece riferiti al valore medio sulla cella triangolare di calcolo del piano campagna. Tuttavia è interessante notare che la regressione lineare dei dati rappresentati è prossima alla linea di perfetta corrispondenza tra i valori osservati e modellati.

6.6 ANALISI DI SENSITIVITÀ SULLA POROSITÀ DEGLI EDIFICI

La modellazione degli edifici attraverso l'elemento *Porous Polygon* comporta che parte del volume dell'onda di piena interessa l'area occupata dall'edificio stesso. Tale assunzione rispecchia la reale dinamica dell'evento alluvionale ma tuttavia il calcolo risulta essere schematizzato in termini di valore percentuale. Ai fini di quantificare gli effetti di tale parametro sono state effettuate diverse simulazioni idrauliche d'evento con differenti valori di permeabilità dei poligoni rappresentati gli edifici del contesto urbano. In particolare sono stati modellati gli edifici come completamente impermeabili (porosità 0%) con porosità pari al 10% e al 20%. I risultati ottenuti sono riportati nella figura seguente dove è possibile il confronto con le aree allagate censite dal Comune di Olbia. Si osserva che la migliore corrispondenza tra le aree modellate e le aree osservate si ottiene con una porosità dei poligoni che rappresentano gli edifici pari al 20%.

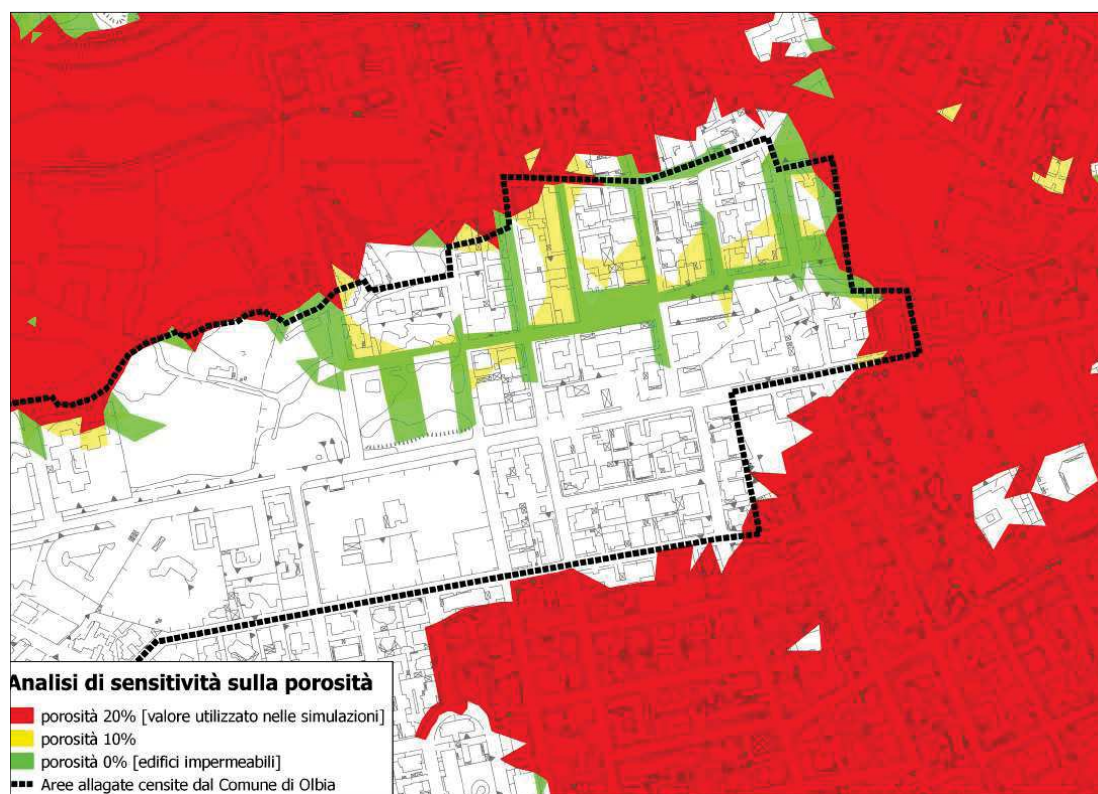


Figura 60. Esempio di un estratto delle aree allagate per differenti valori di porosità dei poligoni che rappresentano gli edifici del contesto urbano del Comune di Olbia.