



Autorità di Bacino – Distretto
Idrografico dell'Appennino Meridionale
Art. 63 c.1 D.Lvo 152/2006 e s.m.i.
D.M. 25.10.2016 - G.u.r.i. 27/2017

AUTORITÀ DI BACINO DELLA PUGLIA

L.R. 9 Dicembre 2002 n. 19

C/o INNOVA PUGLIA S.p.A. (Ex. TECNOPOLIS CSATA) | Str. Prov. per Casamassima Km 3 - 70010 Valenzano – Bari
TEL. 080 9182000/242 – FAX. 080 9182244 | C.F. 93289020724 | www.adb.puglia.it – E-MAIL: SEGRETERIA@ADB.PUGLIA.IT – PEC: SEGRETERIA@PEC.ADB.PUGLIA.IT

Autorità di Bacino della Puglia

PROTOCOLLO GENERALE

adbp A00_AFF_GEN

0008530

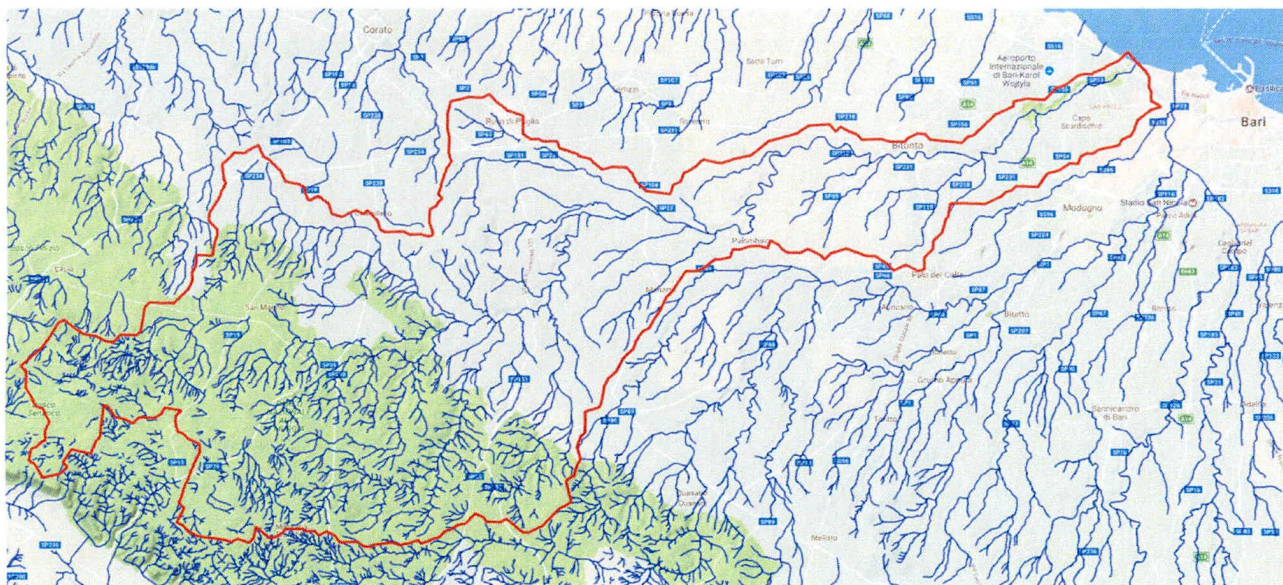
E 21/06/2017 10:53:21

AL Dirigente Ing. Giuseppe Tedeschi
SEDE

OGGETTO *Studio per la Modifica e l'aggiornamento del PAI assetto idraulico, per il bacino idrografico della Lama Balice, territori comunali di Bari, Bitonto e Ruvo di Puglia.*

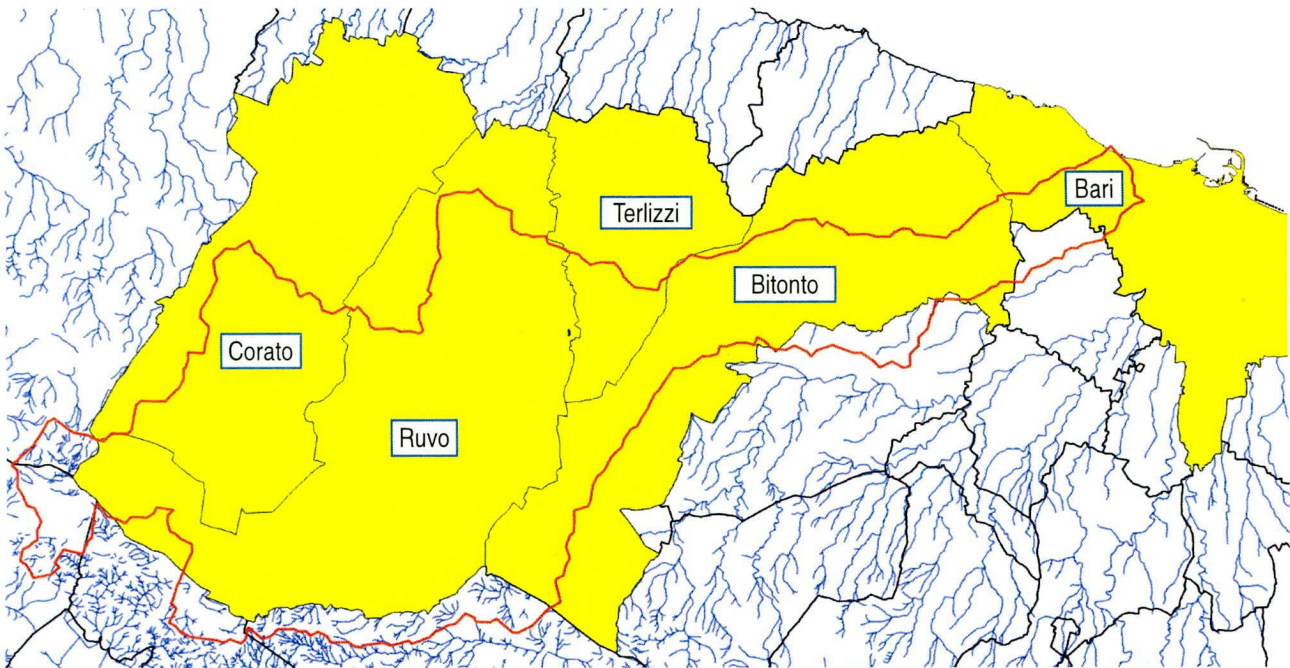
RELAZIONE ISTRUTTORIA

Il territorio della Città Metropolitana di Bari è solcato da numerosi impluvi che, attraversando i territori comunali dell'altopiano murgiano sfociano a mare, per lo più nel territorio comunale di Bari. In riferimento alla pericolosità idraulica ad essi associata, correlata al transito di volumi di piena per prefissato tempo di ritorno, la maggior parte di essi risulta già analizzata nel dettaglio da questa Autorità, tanto che nel vigente PAI sono definite le aree a diversa pericolosità idraulica, come facilmente riscontrabile analizzando il webgis del PAI vigente di questa Autorità. Uno degli impluvi carsici più importante, sia in termini di pericolosità associata e bacino contribuyente, sia in termini naturalistici e paesaggistici, è senza dubbio la Lama Balice.



Bacino idrografico della lama Balice

La lama Balice sorge dalle aree più in quota della murgia ovest, nei territori comunali di Ruvo di Puglia e Corato, ai confini con Spinazzola e Andria, per poi proseguire attraversando i territori comunali di Terlizzi e Bitonti, fino a sfociare a mare nel territorio comunale di Bari.



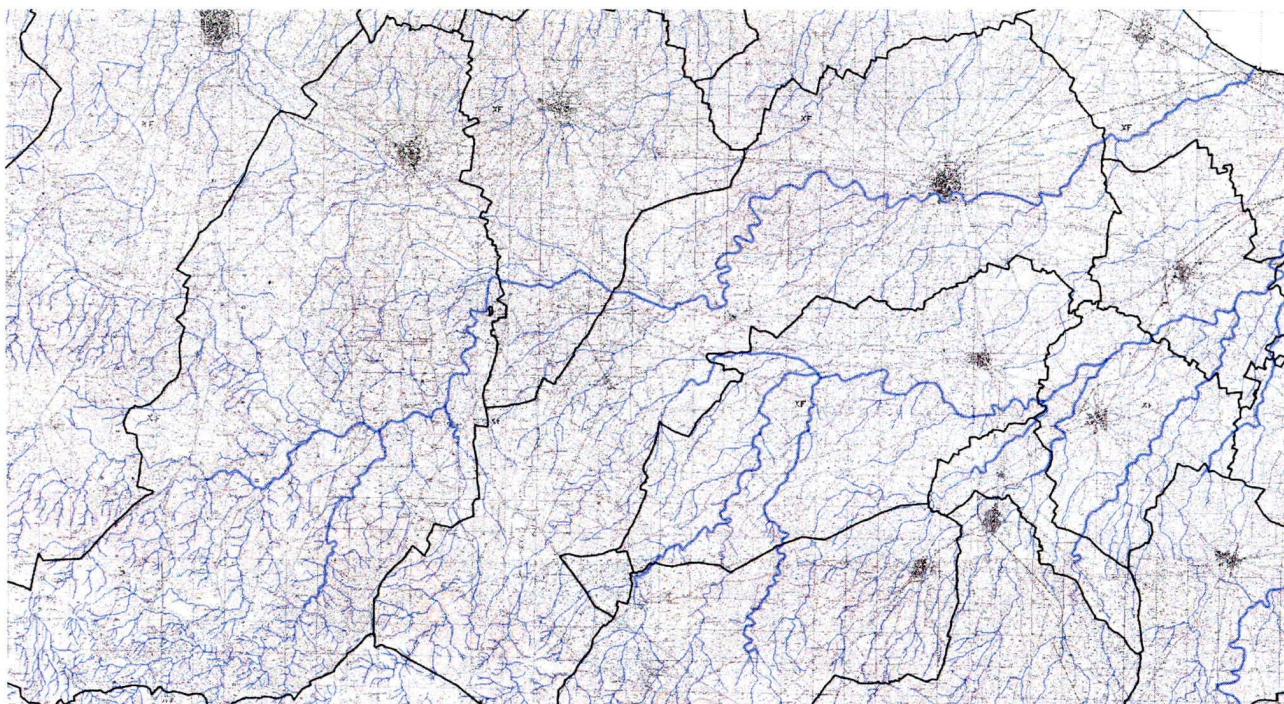
Territori maggiormente interessati dal bacino idrografico della lama Balice

Il presente studio, in continuità con quanto già fatto per i territori attraversati dal torrente Picone e dalla lama Lamasinata, ha la finalità di definire e aggiornare le aree a pericolosità idraulica relative al reticolo idrografico principale della lama Balice.

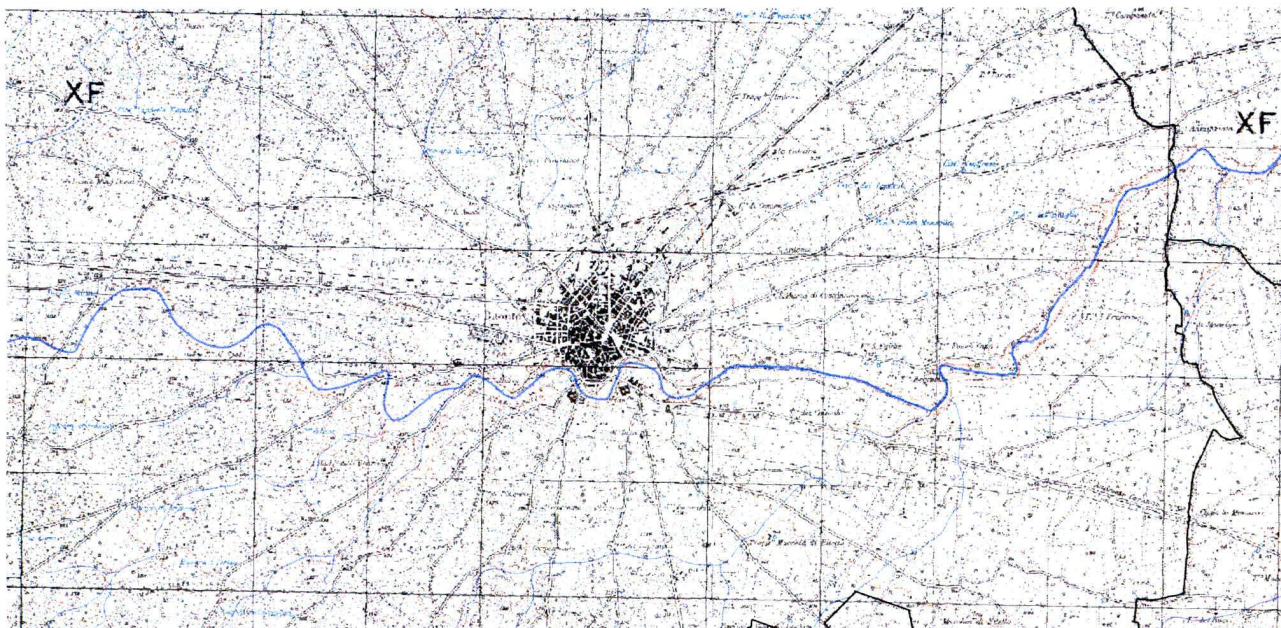
Si descrivono nel seguito, in via sintetica, le procedure e le metodologie applicate per giungere all'individuazione dei livelli di pericolosità idraulica nei territori comunali indicati e si specifica che il presente documento costituisce un atto endoprocedimentale rispetto alla modifica finale del PAI; fornisce pertanto elementi conoscitivi di base in grado di introdurre le argomentazioni necessarie per esaminare la proposta di modifica al PAI. Si rimanda alla Relazione Generale di Piano o alle comuni nozioni note in letteratura tecnico-scientifica per ogni approfondimento relativo alle metodologie di calcolo adoperate dalla Segreteria Tecnica Operativa nello studio in oggetto.

Inquadramento dell'area di studio

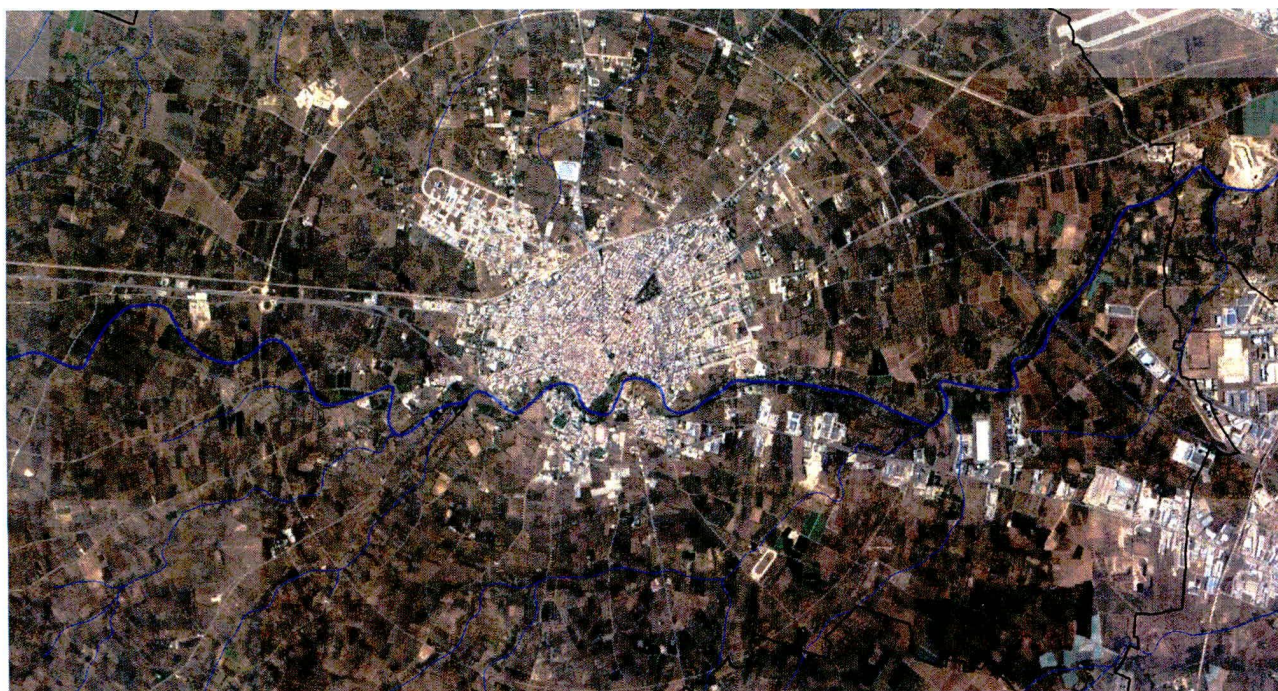
L'area oggetto dello studio condotto, come già anticipato, riguarda la parte di territori comunali interessata dal percorso del reticolo idrografico principale della lama Balice. Il percorso della lama Balice è caratterizzato da un andamento morfologico sub-pianeggiante alternato da tratti morfologici che evidenziano la presenza degli impluvi summenzionati. Il percorso del reticolo interseca in più punti strade Provinciali, statali e linee ferroviarie. La lama Balice conserva per lunghi tratti un percorso naturale, in alcune aree, però, si possono riscontrare zone oggetto di trasformazioni antropiche che sono state attentamente analizzate. Prima fra tutte l'intersezione con l'abitato di Bitonto ma anche le significative intersezioni del tratto di foce, in agro di Bari, con le maggiori arterie di trasporto sia su ferro che su gomma.



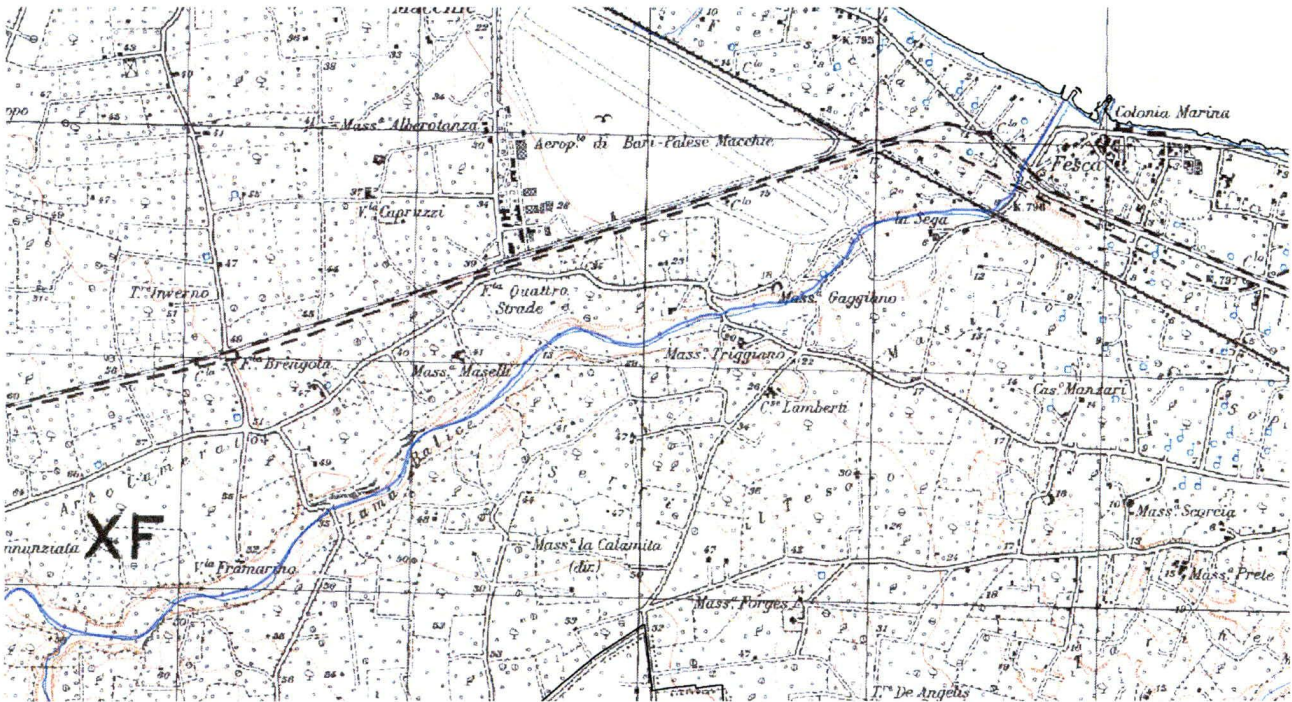
Rappresentazione del reticolo idrografico principale della Lama Balice, su cartografia IGM 1:25000



Rappresentazione dell'intersezione del reticolo idrografico principale della Lama Balice e della città di Bitonto, su cartografia IGM 1:25000



Rappresentazione dell'intersezione del reticolo idrografico principale della Lama Balice e della città di Bitonto, su foto google 2017



Rappresentazione dell'intersezione del reticolo idrografico principale della Lama Balice nel tratto terminale in agro di Bari, su cartografia IGM 1:25000



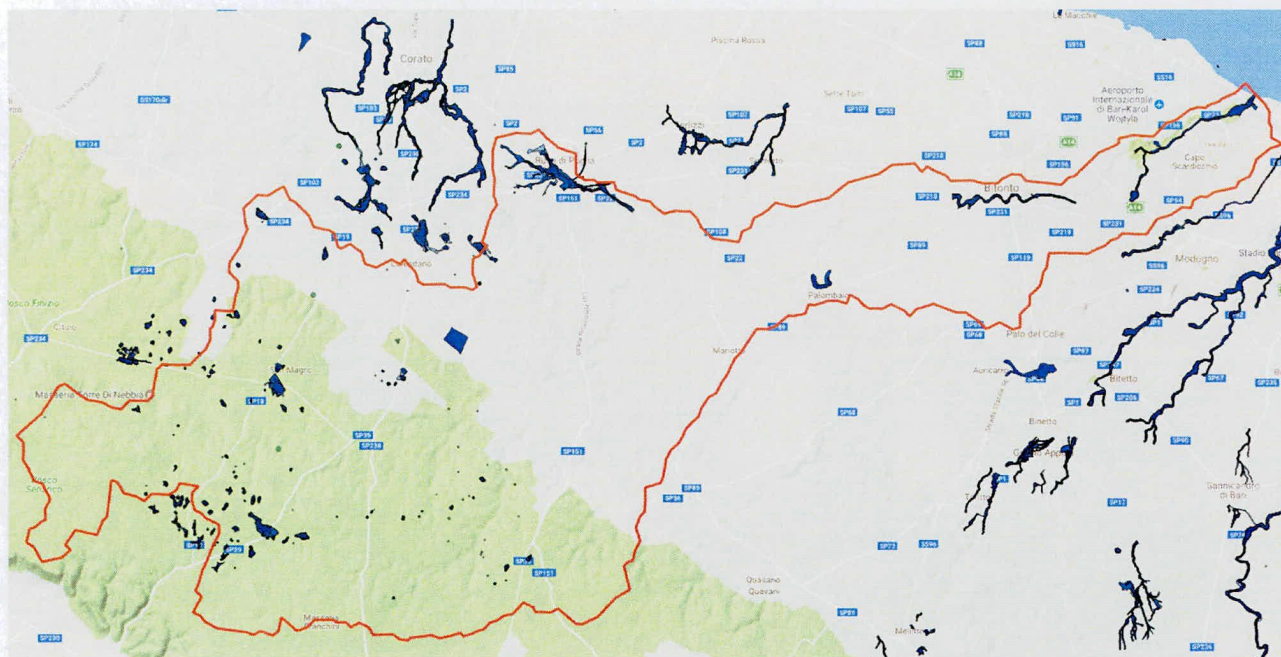
Rappresentazione dell'intersezione del reticolo idrografico principale della Lama Balice nel tratto terminale in agro di Bari, su foto google 2017

L'analisi di carattere idrologico ed idraulico è stata preceduta da un'analisi morfologica del territorio finalizzata all'individuazione preventiva delle depressioni morfologiche in ambiente GIS.

Le valutazioni effettuate sono state condotte facendo riferimento al miglior dato topografico disponibile, per quanto riguarda sia la precisione sia la densità, che nel caso specifico sono costituiti dal rilievo LIDAR fornito dal MATTM

nell'ambito del PST. Inoltre l'intera analisi è stata calibrata sulla scorta dei risultati di sopralluoghi di questa Autorità, dedicati al rilievo dei tiranti massimi registrati in occasione della piena della Balice del 14 giugno 2017.

Allo stato attuale il PAI riporta aree a diversa pericolosità idraulica per tratti discontinui del reticolo principale della lama Balice. Le ragioni di questa circostanza sono molteplici, la principale risiede nella necessità che si è avuta negli anni di dare priorità di analisi, negli studi di dettaglio da condurre, alle aree maggiormente antropizzate. Pertanto il PAI riporta aree a diversa pericolosità idraulica, per esempio, nel tratto che attraversa il territorio comunale di Bitonto, o la foce della lama Balice, in agro di Bari.



Indicazione delle aree a diversa pericolosità idraulica riportate nel vigente PAI nell'intorno del bacino della lama Balice

Dati disponibili

Lo studio condotto, finalizzato alla determinazione delle aree a diversa pericolosità idraulica, ha avuto come database di partenza per le elaborazioni effettuate i seguenti dati:

- Cartografia IGM 1:25000 formato raster;
- Cartografia CasMez 1:5000 formato raster;
- Nuova CTR 1:5000 formato vettoriale;
- Rilievo LIDAR fornito dal MATTM;
- Rilievi di dettaglio del tirante idrico massimo raggiunto durante la piena del 14 giugno 2014 all'intersezione con numerose viabilità;
- Carta Idrogeomorfologica della Regione Puglia;
- Foto aeree a colori.

Le cartografie indicate sono state utilizzate per le analisi di tipo numerico e di tipo interpretativo a seconda del geodatabase associato ad ognuna di esse.

Analisi Morfologica-Morofometrica: dei Bacini idrografici

Il territorio della Città Metropolitana di Bari, è caratterizzato dalla presenza di una vasta rete di reticoli idrografici che alimentano i bacini delle lame principali del territorio; fra queste vi è sicuramente la lama Balice che figura tra le più importanti e significative di tutto il territorio murgiano. Applicando le metodologie di analisi usualmente adoperate dalla STO di questa Autorità per analisi idrologiche ed idrauliche finalizzate alla definizione dei livelli di pericolosità idraulica, si è definito il bacino idrografico chiuso a mare e una serie di sottobacini, chiusi in sezioni ritenute critiche, secondo criteri che vengono nel seguito descritti.

In particolare l'analisi eseguita è stata condotta esaminando tutto il bacino idrografico della lama Balice, definendo le condizioni di pericolosità idraulica per tutto il percorso del suo reticolo principale. Per poter portare a termini l'analisi si è dovuto suddividere l'intero bacino idrografico in sottobacini di grandezza media pari a 10 km², introducendo sezioni di chiusura sia all'intersezioni con le maggiori viabilità sia in quelle sezioni dov'è stato rilevato il tirante idrico massimo in occasione della piena del giugno 2014.

In linea generale l'individuazione del bacino scolante costituisce un passaggio fondamentale al fine della determinazione delle portate al picco di piena. I parametri individuati da questo tipo di analisi costituiscono una parte dell'input dei modelli idrologici e idraulici applicati e descritti nel seguito. Per questo motivo è importante investire risorse sufficienti in modo da avere la maggiore certezza sui risultati ottenuti. L'estrazione dei bacini e della rete idrografica è avvenuta attraverso software GIS, facendo riferimento ad appositi algoritmi di calcolo.

Il modello del terreno, rappresentato nelle tre dimensioni, consente di effettuare valutazioni sull'altimetria dei luoghi, sulle pendenze, sul deflusso delle acque, ecc.; pertanto maggiore è la precisione del modello, intesa anche come densità di punti disponibili, e più attendibili sono le valutazioni che si possono fare.

Le elaborazioni condotte per il caso in esame hanno riguardato l'applicazione in GIS dei seguenti algoritmi:

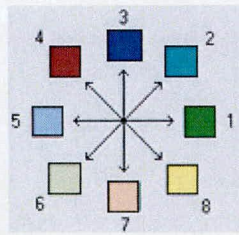
- FLOW ACCUMULATION (*Number of cells that drain through each cell*) – Definizione aree contribuenti

E' il valore della singola cella derivato dal numero di celle che drenano idrologicamente su di essa. Le celle che appartengono al reticolo idrografico delineato hanno alti valori di *flow accumulation*, mentre le celle adiacenti o quelle delle linee spartiacque del bacino hanno valori più bassi. I valori negativi indicano celle che hanno un flusso diretto al di fuori della regione di analisi. A scala di bacino, il valore maggiore si ha alla sezione di chiusura.

- FLOW DIRECTION (*Drainage direction*) – Direzioni di flusso

Vengono stimate le traiettorie del flusso basandosi sulle direzioni di massima pendenza. Un valore 0 indica che la cella è un'area depressa, valori negativi indicano che il flusso è diretto al di fuori della regione di analisi. Nel caso in esame le direzioni di deflusso sono state determinate ipotizzando che il deflusso di una generica cella del DEM avvenga solo

lungo la direzione che esprime il massimo gradiente topografico negativo tra la cella in esame e quelle adiacenti. Le possibili direzioni di uscita del flusso sono 8 (SFD, D8). Nel raster risultante ogni cella avrà un valore intero che indica verso quale delle 8 direzioni avviene il flusso.



Direzioni di deflusso (flow direction)

- BACINI IDROGRAFICI (*Unique labels for each watershed basin*)

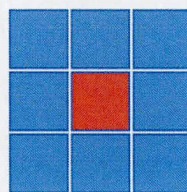
Ogni bacino è identificato da un numero intero assegnato a tutte le celle dello stesso bacino. Le celle che hanno valore 0 sono quelle che non appartengono ad un bacino completo.

- RETICOLO IDROGRAFICO (*Stream segments*)

Definiti i bacini e le aste del reticolo, sono stati estratti i parametri morfometrici necessari alla successiva modellazione idologica:

- la pendenza media del bacino (*slope*):

la mappa delle pendenze che può essere espressa in gradi o in percentuale. Il modello di calcolo (Horn) considera un intorno di 8 celle e risulta più adatto di altri a descrivere superfici più irregolari.



schematizzazione del metodo di HORN per il calcolo della pendenza in GIS

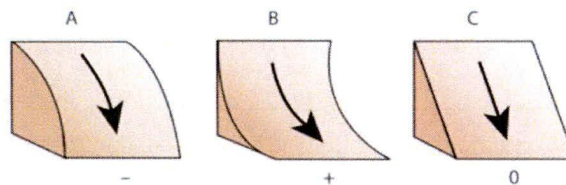
- L'altitudine massima, minima e media;

- l'esposizione (*aspect*):

La mappa determina, utilizzando la direzione di massima pendenza, il valore dell'orientazione della singola cella misurato da 0 a 360° in senso orario partendo da NORD. Le celle prive di orientazione (e quindi pianeggianti) assumono un valore 0 (o -9999 per evitare confusioni). Per le celle che si trovano ai bordi della regione di analisi non è possibile individuare le celle circostanti e viene pertanto assegnato il valore 0. Matematicamente la pendenza rappresenta la derivata prima della superficie morfologica;

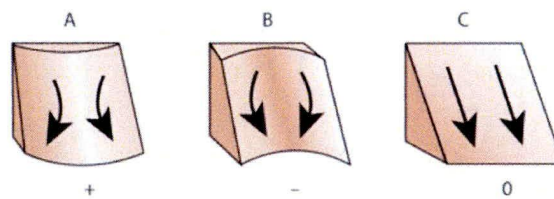
- la lunghezza dell'asta principale (*flow length*);
- la curvatura (longitudinale e tangenziale):

Quella longitudinale rappresenta la curvatura della superficie morfologica lungo la pendenza più ripida. E' espressa in 1/metri, per cui una curvatura di 0.05 corrisponde ad un raggio di curvatura di $1/0.05 = 20$ metri. Valori positivi indicano celle convesse, valori negativi indicano celle concave mentre il valore 0 indica una superficie piana. Questa mappa evidenzia i "terrazzamenti" della superficie.



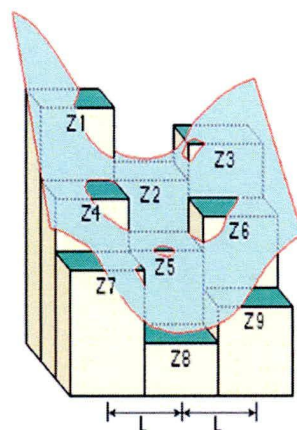
Curvatura del profilo (longitudinale)

Quella tangenziale rappresenta la curvatura in direzione perpendicolare alla tangente al profilo. Valori positivi indicano una divergenza verso i bordi, valori negativi indicano una convergenza dai bordi mentre il valore 0 indica una superficie piana. Questa mappa evidenzia le creste e le valli della superficie.



Curvatura tangenziale

Matematicamente la curvatura rappresenta la derivata seconda della superficie morfologica o, in altri termini, la pendenza della pendenza di una cella. Il raster della curvatura, unito al raster del rilievo (*hillshade*), permette di risolvere con maggiore precisione variazioni locali della superficie.



Generazione delle curvature per celle contigue

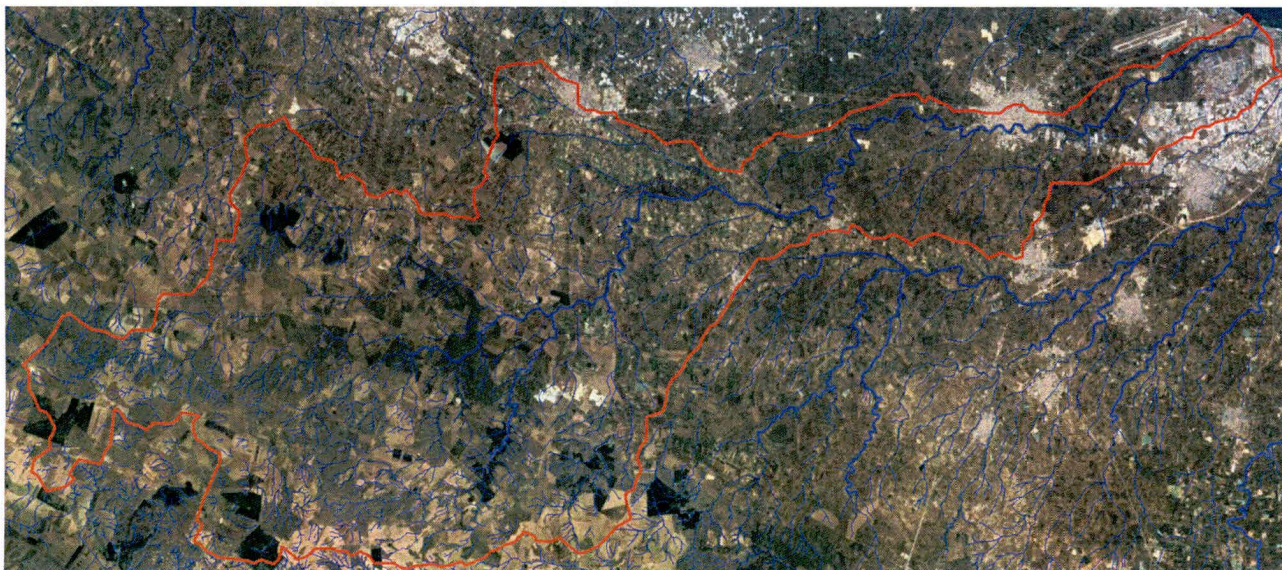
L'analisi morfologica è stata condotta con la finalità di individuare i bacini idrografici afferenti alle sezioni di chiusura oggetto delle modellazioni idrodinamiche descritte nel seguito. La determinazione dei bacini idrografici è stata il risultato combinato di studi di dettaglio condotti con l'ausilio di software GIS, basandosi sulla cartografia tecnica e sugli algoritmi precedentemente elencati, nonché su molteplici indagini in campo che si sono rese necessarie a causa della moltitudine di situazioni di più complessa interpretazione, della cartografia e dei rilievi disponibili, legate al grado di antropizzazione del territorio esaminato.

Lo studio è stato condotto a scala globale interessando gli interi bacini idrografici dalla zona, sino a mare. Esso è stato eseguito realizzando un modello morfologico-idrologico complessivo a scala di bacini, in grado di determinare i parametri per la valutazione degli idrogrammi di piena per ogni asta del reticolo idrografico sino allo sbocco a mare. Per realizzare il modello, si è proceduto individuando i bacini idrografici generali e i relativi sottobacini. Al fine di poter applicare in maniera corretta le metodologie di calcolo successivamente esposte, sono stati individuati i sottobacini iso-caratteristici determinati anche in funzione dei punti critici del reticolo idrografico in rapporto ai diversi territori comunali attraversati.

Attraverso l'applicazione dei modelli di analisi morfologica ed idrologica in ambiente GIS, sono stati determinati, per ciascuno dei sottobacini, i parametri necessari per le valutazioni idrologiche conseguenti tra cui: area del bacino contribuente, perimetro del bacino contribuente, quota massima, minima e media del bacino e, infine, i parametri necessari per l'applicazione del modello afflussi-deflussi SCS-CN (*curve number* e *basin lag*) che verranno descritti nei paragrafi successivi.

L'analisi idrologica, che verrà dettagliatamente descritta nei paragrafi successivi, è stata dunque condotta utilizzando un software di calcolo estremamente affidabile a scala internazionale oltre che gratuitamente reso disponibile dal Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers: trattasi del HEC – HMS.

Lo sviluppo planimetrico dei bacini idrografici è stato definito attraverso l'utilizzo di ESRI-ArcGis facendo riferimento all'estensione HEC-GEOHMS, sulla base del database topografico e cartografico di dettaglio in precedenza descritto, si è pertanto proceduto al calcolo delle corrispondenti caratteristiche morfometriche.



Bacino idrografico della lama Balice

CARATTERISTICHE FISIOGRAFICHE DEL BACINO DI STUDIO CHIUSO ALLA FOCE					
Area contribuente (Km ²)	Pendenza media del bacino $i_m(\%)$	Quota minima del bacino $Q_{min}(m\ s.l.m.)$	Quota massima del bacino $Q_{max}(m\ s.l.m.)$	Quota media del bacino $Q_{ave}(m\ s.l.m.)$	Lunghezza dell'asta principale del bacino $L_{max}(Km)$
339.61	4.84	0.34	635.00	316.87	61.54

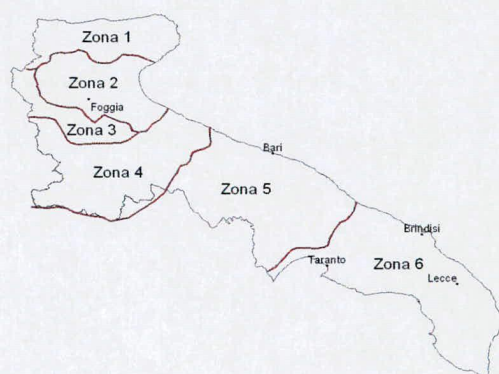
caratteristiche morfometriche del bacino complessivo della Lama Balice

Analisi idrologica

L'analisi idrologica prevede come fase preliminare l'individuazione dei bacini idrografici e il calcolo dei parametri morfometrici. I dati ricavati sono utilizzati nelle elaborazioni pluviometriche e nei modelli afflussi-deflussi che consentono di determinare gli idrogrammi di piena riferiti ai tempi di ritorno prefissati. L'analisi pluviometrica, così come previsto dalla Relazione Generale di Piano allegata al PAI approvato il 30/11/2005 nonché dal D.P.C.M. del 29 settembre del 1998, è stata effettuata secondo la metodologia VAPI Puglia "Valutazione Piene" sviluppata dal Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCl). Essa ha consentito di individuare le curve di possibilità pluviometrica grazie alle quali è stato determinato lo ietogramma di pioggia che costituisce input del modello afflussi-deflussi dal quale si ricavano gli idrogrammi di piena.

Questo tipo di analisi, in linea con le metodologie di calcolo adottate da questa Autorità, è stata condotta facendo riferimento al modello SCS-CN.

Il progetto VAPI Puglia individua 6 zone omogenee; nello studio condotto l'analisi regionale di terzo livello, basata sull'analisi di regressione delle precipitazioni di diversa durata con la quota, ha portato all'individuazione dei bacini esaminati, che si trovano nella zona omogenea numero 5, e a definire le rispettive curve di possibilità pluviometrica relative ai tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni.



Va.Pi. zone omogenee per la Puglia

In particolare, per ognuna delle sei zone omogenee al terzo livello di regionalizzazione, il rapporto Va.Pi. individua una relazione che consente di determinare i parametri a ed n della curva di possibilità pluviometrica. Per la zona 5 la relazione proposta è la seguente:

$$\text{Zona 5: } x(t,z) = 28.2t^{[(0.628+0.0002 Z)/3.178]}$$

Con riferimento alla stessa procedura VAPI, il risultato fornito da questa relazione esprime l'andamento dei valori medi delle precipitazioni massime annuali e per derivare il valore associato ad un prefissato tempo di ritorno esso va moltiplicato per un fattore di crescita, che è definito dalla seguente relazione:

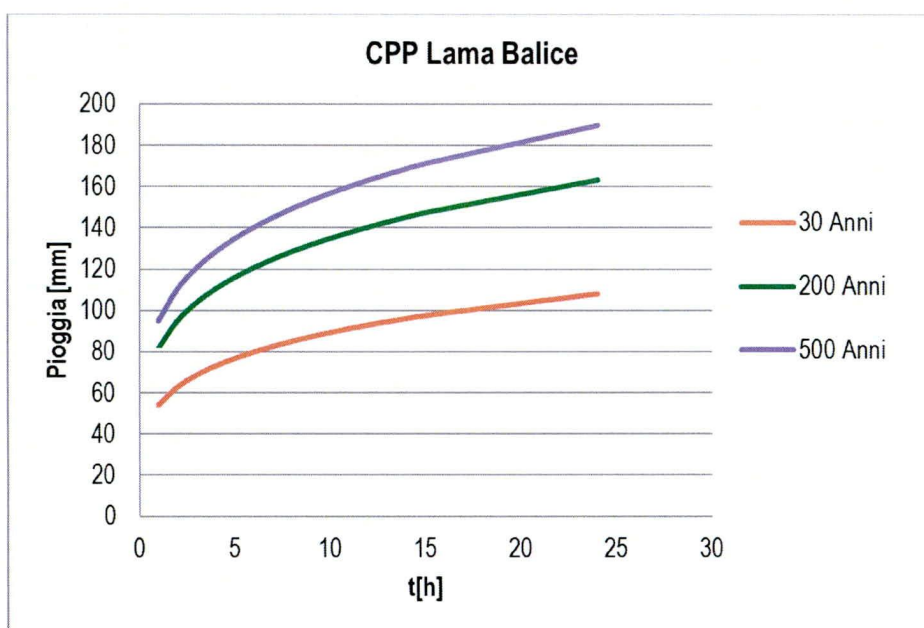
$$K_T = 0,1599 + 0,5166 \cdot \ln T$$

Dall'applicazione della metodologia appena descritta si ricavano le curve di possibilità pluviometrica (CPP) riferite ai tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni. Dette curve sono state utilizzate nella fase di modellazione idrologica per l'analisi della trasformazione afflussi-deflussi.

Ad esempio per un tempo di ritorno di 200 anni il KT risulta:

$$K_T = 0,1599 + 0,5166 \cdot \ln(200) = 2,897$$

A titolo esemplificativo vengono nel seguito riportate le curve di possibilità pluviometrica calcolate, utilizzando la quota media del bacino nella relazione della zona omogenea numero 5, per il bacino della lama Balice.



CPP Lama Balice Va.Pi. Zona 5

Modello Afflussi - Deflussi

Per la valutazione afflussi-deflussi nel caso in esame, in considerazione delle caratteristiche morfometriche, geolitologiche, di uso del suolo e del livello di antropizzazione del bacino individuato, si è proceduto all'applicazione del metodo SCS-CN.

L'applicazione del metodo SCS-CN, è possibile previa determinazione del curve number "CN" che individua attraverso l'analisi geolitologica dei suoli del bacino, la capacità di risposta che lo contraddistingue, in termini di infiltrazione e ruscellamento, a fronte di un evento di pioggia. Nel caso in esame le caratteristiche geolitologiche sono state determinate facendo riferimento alla carta dei suoli redatta dall'IRSA CNR in scala 1:100.000, ed è stato possibile caratterizzare i suoli dal punto di vista della permeabilità secondo la classificazione SCS.

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. Elevate capacità di infiltrazione anche in condizioni di saturazione.
Gruppo C	Suoli aventi potenzialità di deflusso moderatamente alta. Suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloid. 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.

Gruppi geolitologici

Riguardo all'uso del suolo si è fatto riferimento allo studio ACLA condotto dal CHIEAM in cui sono state individuate le seguenti classi alle quali sono stati associati i parametri di CN riscontrati in letteratura scientifica.

Uso del Suolo	A	B	C	D
<ul style="list-style-type: none"> Aree agricole con presenza di spazi naturali Seminativi in aree non irrigue Vigneti non irrigui Colture temporanee associate a colture permanenti Frutteti e frutti minori non irrigui 	62	71	78	81
• Aree Urbane	92	92	92	92
• Area residenziale	77	85	90	92
• Bacini d'acqua	100	100	100	100
<ul style="list-style-type: none"> Colture erbacee da pieno campo a ciclo primaverile estivo Colture orticole a ciclo estivo autunnale/primaverile Colture orticole a ciclo primaverile-estivo Frutteti e frutteti minori irrigui Oliveti irrigui Sistemi colturali e particellari complessi Vigneti irrigui Sistemi colturali e particellari complessi Vigneti irrigui 	72	81	88	91
Prati stabili non irrigui	30	58	71	78
Zone Boscate	45	66	77	83

valori del CN in funzione del gruppo idrologico e dell'uso del suolo

Negli studi condotti per ogni cella della griglia considerata si è sovrapposto il parametro geolitologico a quello di uso del suolo ottenendo una mappa in cui è stato possibile assegnare il corrispondente valore del parametro CN. Il valore del CN associato al bacino idrografico studiato è stato calcolato come media ponderale dei valori di CN di ogni cella della griglia di calcolo impostata. La mappa a cui si è fatto riferimento è quella redatta da questa Autorità nel 2013.

Nel seguito vengono descritte le applicazioni delle metodologie sopra indicate al caso in esame.

Analisi Idraulica

Il reticolo idrografico della lama Balice, così come il resto del reticolo carsico murgiano, è caratterizzata dall'alternanza di tratti morfologicamente molto pronunciati e di tratti sostanzialmente subpianeggianti. In aggiunta c'è da considerare l'intersezione che il reticolo ha con aree negli anni sempre più antropizzate, ad iniziare dalle infrastrutture a rete, in particolare quelle viarie, e a concludere con porzioni di centri abitati o zone produttive.

L'insieme di queste prerogative obbliga gli ingegneri che devono analizzare le pericolosità idrauliche, all'adozione di un approccio modellistico variabile. In sostanza se per alcuni tratti del reticolo idrografico è possibile adoperare modelli di propagazione delle piene a schema monodimensionale, per altri è obbligatorio far riferimento a modelli per la propagazione delle piene in domini a due dimensioni, in moto vario.

Anche per il reticolo principale della lama Balice si è reso necessario questo tipo di approccio modellistico; in prima battuta si sono effettuate analisi su tutto il reticolo con un modello di propagazione 1D (HEC-RAS), per i tratti dove detti modelli non si sono potuti applicare, si è adoperato un modello di propagazione 2D (SMS-TUFLOW), modello idraulico bidimensionale capace di considerare, a differenza dei monodimensionali, anche le componenti della velocità ortogonali alla direzione dell'asse dell'alveo e quindi in grado di descrivere fenomeni di flusso che si sviluppano nel piano, fornendo in ogni punto la direzione e l'intensità della velocità media sulla verticale.

Il caso studiato inoltre, è stato affrontato operando un'analisi di taratura su più sezioni, basata sui dati dei tiranti massimi rilevati in occasione della piena del giugno 2014.

Teoria dei modelli idraulici utilizzati

» Modello idraulico monodimensionale

Il modello utilizzato per le analisi monodimensionali è quello implementato nel programma di calcolo e modellazione idraulica maggiormente diffuso, l'HEC RAS. La sigla è un acronimo di Hydrologic Engineering Center's River Analysis System, il software è prodotto dallo US ARMY engineering corps, ed è gratuitamente scaricabile da internet.

Di seguito si illustrano brevemente i contenuti del modello, rimandando ogni approfondimento, ai documenti presenti sul sito ufficiale (www.hec.usace.army.mil).

HEC-RAS è un programma realizzato per simulare la propagazione delle piene attraverso uno schema di calcolo monodimensionale; il software può lavorare in moto permanente o vario, e, oltre che analizzare la singola asta fluviale (come nel caso in studio), è possibile analizzare reticoli più complessi, che prevedono la confluenza di più canali. Inoltre è possibile prevedere trasporto di sedimenti, stazioni di pompaggio e celle di accumulo (nel caso di modellazione in moto vario). Le valutazioni possono anche effettuarsi ipotizzando il fondo variabile e la variazione della temperatura.

Il software dispone di una interfaccia grafica attraverso cui inserire i dati fisici necessari (caratteristiche geometriche dell'asta), idraulici (condizioni al contorno e portate di verifica), ed applicare le differenti routine di modellazione, ovvero scegliere le metodologie di calcolo. Inoltre è sviluppato e gratuitamente distribuito un applicativo in ambiente GIS (GEO RAS), attraverso cui è possibile realizzare le attività di pre e post-processing delle applicazioni dell'HEC RAS, sino alla individuazione delle aree inondate.

Avendo, come vedremo, utilizzato il modello relativamente alle condizioni di moto permanente, si fa un breve cenno alle routine di calcolo utilizzate dal software.

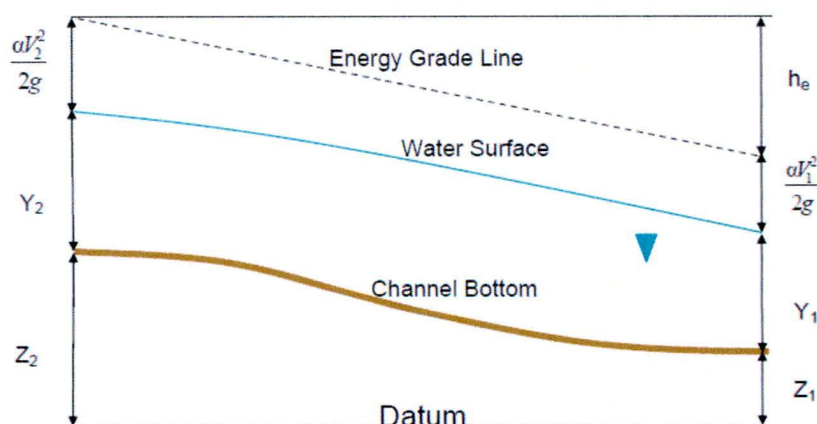
Nel caso di moto permanente, il software è in grado di modellare profili sia di correnti lente che veloci, ed inoltre è possibile valutare profili misti, con passaggio attraverso lo stato critico.

Il profilo idraulico è calcolato normalmente (standard step method) attraverso la soluzione iterativa della equazione dell'energia, tra due sezioni consecutive. Le perdite relative al termine cinetico dell'equazione, sono calcolate aggiungendo alle perdite continue per attrito, "J", un coefficiente di contrazione/espansione, che viene moltiplicato per la differenza delle altezze cinetiche medie tra due sezioni successive.

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} + h_e \quad (\text{equazione dell'energia})$$

dove:

Y_1 e Y_2 = tirante idraulico nelle sezioni corrispondenti
 Z_1 e Z_2 = quota di fondo alveo nella sezione corrispondente
 α_1 e α_2 = coefficiente di velocità nella sezione corrispondente
 g = accelerazione gravitazionale
 h_e = perdite di energia



rappresentazione schematica dei profili del terreno, della corrente e dell'energia fra due sezioni.

L'equazione che esprime la perdita di energia è la seguente:

$$h_e = LJ' + C \left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right)$$

dove:

L = lunghezza del tratto di alveo compreso tra le due sezioni successive, "pesata" in funzione della portata defluente all'interno della sezione trasversale su zone con differente coefficiente di attrito (basato sulla equazione di Manning)

J' = pendenza di attrito "rappresentativa" (media) delle due sezioni successive (in caso di moto uniforme sarebbe parallela al fondo e costante).

C = coefficiente di contrazione o di espansione

Occorre ribadire che il software è programmato per il calcolo di profili nell'ipotesi monodimensionale, e quindi fornisce, per ciascuna sezione trasversale, un'unica altezza del pelo libero e un'unica altezza della linea dell'energia. L'altezza della linea dell'energia è ottenuta calcolando un valore "pesato" dalla portata di ciascuna delle sottosezioni in cui si può suddividere la sezione trasversale.

Per calcolare quindi il valore dell'energia per l'intera sezione, bisogna ricavare la parte relativa alla altezza cinetica media, passando attraverso la valutazione del coefficiente di velocità α (a sua volta "pesato"):

$$\alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2}$$

In generale si ottiene, per $Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_N$:

$$\alpha = \frac{[Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_N V_N^2]}{Q V^2}$$

Come detto, le perdite continue per attrito sono valutate come il prodotto di

$$J'_f \times L$$

dove J'_f è la pendenza media della linee dell'energia tra due sezioni consecutive distanti tra loro L (pesate in funzione delle "portate trasversali").

La pendenza della linea dell'energia è calcolata, per ciascuna sezione, tramite l'equazione di Manning, nel modo seguente:

$$J_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2$$

dove K rappresenta il termine di "trascinamento" e quindi influenza le perdite continue; il modello contiene espressioni alternative che possono essere scelte dall'utente. In particolare l'espressione

$$J_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$$

è quella di default nel programma.

Le *perdite per contrazione ed espansione*, rappresentative in un certo senso delle perdite localizzate, sono calcolate in HEC-RAS tramite la seguente equazione:

$$h_{ce} = C \left[\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right]$$

dove:

C = coefficiente di contrazione o espansione.

Il programma assume che vi sia una contrazione, ogni volta che l'altezza cinetica (velocity head) a valle è maggiore di quella immediatamente a monte. Al contrario si assume una espansione, quando la altezza cinetica a valle è minore di quella di monte.

In definitiva l'equazione della energia, al fine della valutazione della incognita ovvero del tirante idrico nella singola sezione, viene applicata in maniera iterativa, secondo il seguente schema, assegnate che siano le condizioni al contorno:

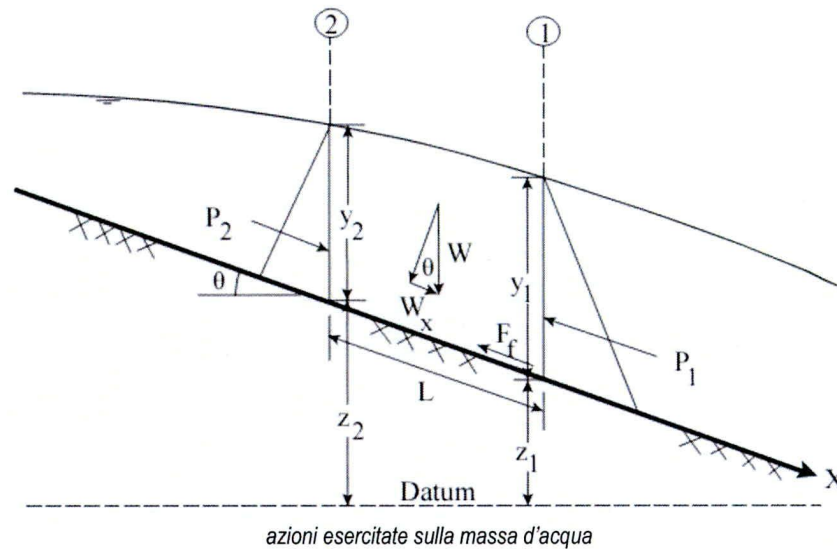
1. viene assunta una altezza del pelo libero nella sezione a monte di quella ritenuta nota (o a valle a seconda se siamo in corrente lenta o veloce);
2. su questo valore ipotetico, si valutano i valori di K e della altezza cinetica;
3. viene calcolato il termine Jf e quindi e, di conseguenza, viene valutato he;
4. con i valori ricavati, si ricava la altezza del pelo libero nella sezione di monte;
5. si confrontano il valore appena ricavato, con quello assunto al punto 1 e si reitera il calcolo, sino ad una tolleranza di 0.003 m (valore predefinito, modificabile dall'utente).

Il criterio utilizzato per l'assunzione di una altezza iniziale del tirante, varia nell'ambito della procedura, man mano che si sviluppano passaggi successivi. Nel primo passaggio, relativo ai 5 punti descritti, il tirante si basa sulla proiezione di quello della sezione precedente nella sezione in studio. Nel secondo passaggio, invece, è utilizzato il tirante del primo passaggio, incrementata del 70% dell'errore risultante al primo passaggio (altezza calcolata – altezza assunta). Il terzo passaggio e i successivi, sono invece basati su un metodo di proiezione “secante”, tendente a limitare la discrepanza evidenziata.

In tutte le situazioni in cui non sia un profilo di corrente gradualmente variato, ma che prevedono risalti idraulici, passaggio attraverso lo stato critico (per bruschi cambi di pendenza, restringimenti, attraversamenti, ponti) e quindi si generano profili di corrente rapidamente variati, il programma utilizza in luogo della equazione dell'energia, l'equazione del momento, o dell'equilibrio dinamico.

Partendo dalla seconda legge di Newton ($F = m \cdot a$, ovvero Forza=massa*accelerazione), applicata ad una massa d'acqua compresa tra due sezioni; l'espressione della differenza dei momenti nell'unità temporale tra le sezioni 1 e 2, si esprime con la seguente equazione scalare:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x$$



dove:

P = spinta sulle sezioni 1 e 2

W_x = forza peso nella direzione del moto

F_f = forza dovuta alle perdite per l'attrito esterno tra 2 e 1

Q = portata

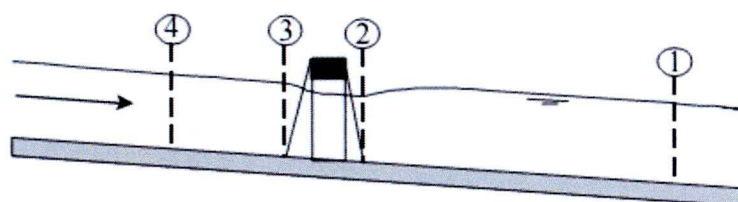
ρ = densità dell'acqua

ΔV_x = cambio di velocità tra 2 e 1 nella direzione del moto.

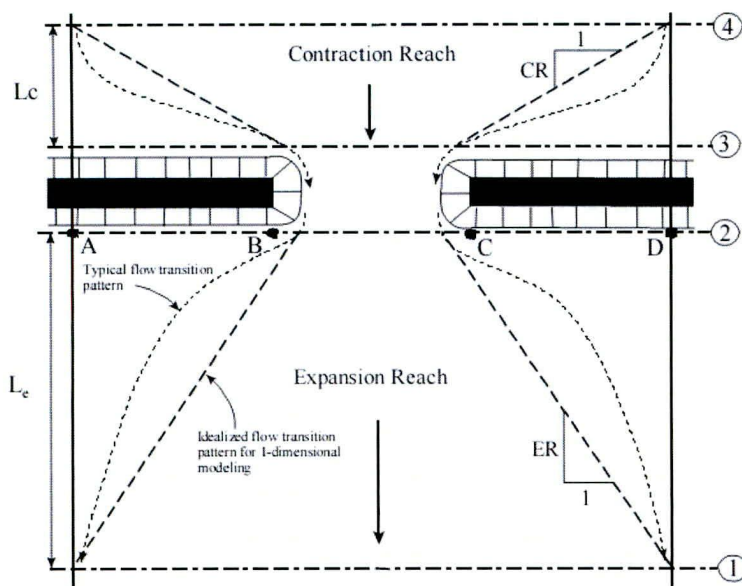
Risolvendo le varie componenti dell'equazione base, si perviene alla formulazione usata dal modello che la soluzione dell'equazione dei momenti, che risulta essere la seguente:

$$\frac{Q_2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_0 - \left(\frac{A_1 + A_2}{2} \right) L \bar{S}_f = \frac{Q_1 \beta_1}{g A_1} + A_1 \bar{Y}_1$$

Nel caso di presenza di attraversamenti dei fiumi da parte di infrastrutture a rete la procedura di calcolo individua 4 sezioni a cavallo di ognuno di essi (2 a monte e 2 a valle) che sono influenzate dalla presenza dello stesso.



sezioni interessate dall'interferenza di un attraversamento con il moto a pelo libero dell'acqua



sezioni interessate dall'interferenza di un attraversamento con il moto a pelo libero dell'acqua

Le sezioni 3 e 2 sono quelle adiacenti all'attraversamento; in esse va inserita la porzione di sezione non interessata dal deflusso idrico (ineffective flow areas) a causa del restringimento (a monte) e dell'allargamento (a valle) dei filetti fluidi che, pertanto, non impegnano l'intera sezione. Dal manuale del software si riscontra la possibilità di considerare un rapporto 1 a 1 di contrazione ed espansione fra le sezioni dell'attraversamento e quella immediatamente a monte o valle (sezioni 3 e 2) a patto che venga impostata una distanza dall'impalcato del ponte, quanto più piccola possibile.

La sezione 4 è quella a monte della 3 ove si ipotizza che immediatamente a valle i filetti fluidi tendano a convergere e non sono più paralleli. Per questa sezione il rapporto di contrazione diventa CR a 1, dove CR è il coefficiente di contrazione. Dal manuale del software si evince che da un punto di vista numerico la sezione 4 dovrebbe trovarsi ad una distanza (L_c) pari alla media delle distanze AB e CD, ovvero delle spalle dell'attraversamento che provocano la contrazione dei filetti.

La sezione 1 è quella a valle della 2 dove si ipotizza che i filetti fluidi ritornino ad essere paralleli, il rapporto di espansione è ER a 1 dove ER è il coefficiente di espansione. La sezione 1 dev'essere posta sufficientemente a valle dell'attraversamento in modo da non risentire dell'effetto dello stesso. Dal punto di vista numerico, questa distanza, dipende dalla luce dell'attraversamento, dalla larghezza, dalla forma, dalla pendenza, dalla scabrezza e dalla velocità della corrente. Nella pratica non esiste un metodo univoco per la sua determinazione ma esso va valutato caso per caso; generalmente questo valore non può essere inferiore a quattro volte la larghezza della strozzatura.

Per concludere questa panoramica sul modello, si rammenta la possibilità di inserire nella geometria del sistema aree di accumulo e rilascio, di esondazione al di fuori del canale principale, e di deposito temporaneo o definitivo (ovvero zone in cui la componente cinetica si annulla).

Al fine di applicare il modello idraulico monodimensionale in maniera corretta, negli studi condotti, si è reso necessario, o si è acquisito dall'Amministrazione, un rilievo topografico di dettaglio che rilevasse, oltre che la geometria

fondamentale del tratto di torrente analizzato, tutte le particolarità riscontrate. Il rilievo, pertanto, ha consentito di determinare l'andamento morfologico del torrente necessario per simulare la propagazione della piena su di esso. Le simulazioni sono state condotte facendo riferimento al moto permanente, solo in alcuni casi particolari si è applicato il moto vario, sempre utilizzato invece per i modelli idraulici bidimensionali.

Il rilievo è stato generalmente condotto intensificando i punti di ripresa in funzione di:

- variazioni evidenti della geometria della sezione;
- variazione significativa della pendenza;
- presenza di infrastrutture di attraversamento (sezioni immediatamente a monte e a valle di ognuno di essi);
- presenza di singolarità idrauliche o strutture di regimazione della piena quali briglie e soglie (sezioni immediatamente a monte e a valle di ognuna di esse).

» Modello idraulico bidimensionale

Esaminando la morfologia dei luoghi e considerando le prevedibili dinamiche idrauliche, al fine di studiare la propagazione dell'onda in aree dove non è possibile individuare a priori in maniera certa una direzione principale di propagazione delle piene, si è ritenuto opportuno l'utilizzo di un modello idraulico bidimensionale capace di considerare, a differenza dei monodimensionali, anche le componenti della velocità ortogonali alla direzione dell'asse dell'alveo e quindi in grado di descrivere fenomeni di flusso che si sviluppano nel piano, fornendo in ogni punto la direzione e l'intensità della velocità media sulla verticale.

Il modello di calcolo utilizzato è il TUFLOW (Two-dimensional Unsteady Flow) della BMT WBM, con interfaccia SMS v.10.0 della EMS-I (Environmental Modeling Systems, Inc.), di cui l'Autorità di Bacino della Puglia ha acquisito regolare licenza d'uso.

Il TUFLOW è specifico per le simulazioni idrauliche bidimensionali delle correnti a superficie libera e risulta quindi particolarmente idoneo per descrivere comportamenti idrodinamici in ambienti come aree costiere, estuari, fiumi, pianure alluvionali e aree urbane, dove le complesse direzioni di flusso non sono correttamente rappresentabili mediante i tradizionali modelli monodimensionali.

Il modello è stato sviluppato da una ricerca congiunta tra la WBM Oceanics Australia e l'Università del Queensland nel 1990. Nato come modello idraulico bidimensionale, oggi incorpora anche le funzionalità del sistema ESTRY, basato sulle equazioni complete monodimensionali, ed implementa il legame dinamico 1D/2D, che offre al modello maggiore versatilità e stabilità. Il TUFLOW è stato inoltre soggetto ad intensi test di validazione da parte del WBM Pty Ltd e altri. Il programma nel tempo continua ad evolvere per incontrare le esigenze della modellazione idrodinamica. Altre caratteristiche, che lo hanno reso oggetto della scelta di questa Autorità, sono la rappresentazione di domini multipli 2D, la rappresentazione delle strutture idrauliche 1D e 2D, la simulazione delle correnti supercritiche 1D e 2D, l'interfaccia con il GIS e gli accurati strumenti di controllo della qualità degli output.

Da un punto di vista analitico, il TUFLOW fornisce le soluzioni delle equazioni monodimensionali e bidimensionali delle acque basse (Shallow Water Equations), conosciute anche come equazioni complete di De Saint Venant, utilizzate per simulare la propagazione dell'onda nelle correnti a superficie libera. Tali equazioni sono impiegate per modellare onde lunghe, come quelle delle alluvioni e delle onde oceaniche, in quanto si basano sulla ipotesi che la componente orizzontale della velocità sia uniforme lungo la verticale e sulla ipotesi di mancanza di accelerazione verticale (ipotesi di distribuzione idrostatica delle pressioni), assunzioni valide per l'appunto dove la lunghezza delle onde è decisamente maggiore del tirante idrico.

Le 2D SWE sul piano orizzontale sono descritte dalle equazioni differenziali parziali della continuità della massa e della conservazione della quantità di moto nella direzione X, parallela all'asse dell'alveo, e Y, normale all'asse dell'alveo, in moto vario. Di seguito si riporta la formulazione del sistema di equazioni.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(Eq. di continuità 2D)} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hv)}{\partial y} = 0 \\ \\ \text{(Eq. del moto lungo l'asse X)} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - c_f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} - \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = F_x \\ \\ \text{(Eq. del moto lungo l'asse Y)} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + c_f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} - \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = F_y \end{array} \right.$$

dove

ζ = elevazione del pelo libero

u e v = componenti della velocità mediate lungo la verticale nelle direzioni X e Y

H = tirante del pelo libero

t = tempo

x e y = distanze nelle direzioni X e Y

c_f = coefficiente di ragguglio della potenza cinetica (o coefficiente di Coriolis)

C = coefficiente di Chezy

μ = coefficiente di viscosità

p = pressione atmosferica

ρ = densità dell'acqua

F_x e F_y = somma delle componenti delle forze esterne nelle direzioni X e Y

Appare opportuno esplicitare, per una migliore comprensione dell'influenza dei parametri idrodinamici nella modellazione, due termini delle equazioni precedentemente riportate.

Il coefficiente di Chezy C viene precisato con l'espressione di Manning, che lo pone in relazione con un indice di scabrezza n e con il raggio idraulico R , ovvero con la scabrezza relativa dell'alveo:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$$

Vale la pena, inoltre, di fare qualche breve considerazione sui valori da attribuire, per le correnti a pelo libero, agli indici di scabrezza. A tal proposito è stata effettuata un'analisi di sensitività all'indice di scabrezza di Manning, al fine di comprendere l'influenza della sua variazione sui tiranti della corrente idrica e sull'estensione del tracciato planimetrico delle aree inondate.

Il penultimo termine delle equazioni di moto considera gli effetti degli sforzi tangenziali, che determinano la resistenza allo scorrimento. Nel caso di moto laminare, le componenti dello sforzo di taglio dipendono dal coefficiente di viscosità dinamica μ , il quale determina la capacità di un fluido di scambiare internamente energia attraverso i filetti che scorrono parallelamente tra loro. Per il moto laminare esso vale:

$$\tau = \mu \frac{\delta_v}{\delta_s}$$

dove v è la componente della velocità nella generica direzione s . Il coefficiente di viscosità dinamica, per l'acqua pura alla temperatura di $15,6^\circ$ vale $1,12 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-2}\text{s}$. E' possibile quindi quantificare lo scambio di energia all'interno della corrente per sforzo tangenziale tra i filetti fluidi che scorrono parallelamente tra loro. Le parti di energia dissipata per mutuo attrito fra i filetti provocano il rallentamento del moto.

Nella realtà il moto avviene in condizioni di turbolenza, nelle quali il liquido scorre con un continuo e irregolare scambio di particelle liquide tra i filetti, tanto più frequente e violento quanto maggiore è la turbolenza (ovvero il numero di Reynolds). In tal caso, il fenomeno di scambio e dissipazione energetica per sforzo tangenziale interno non è ancora stato teorizzato in una formulazione sufficientemente rappresentativa. Convenzionalmente, si assume una formula analoga a quella utilizzata nell'ipotesi di moto laminare, nella quale si utilizza il parametro chiamato *eddy viscosity* o coefficiente di scambio turbolento, il cui ordine di grandezza varia tra 100 e 1000 volte il valore del coefficiente di viscosità dinamica.

Tale parametro può essere formulato nel TUFLOW con due metodi alternativi. Il primo fissa per tale parametro un valore costante, il quale risulta generalmente soddisfacente per celle la cui dimensione è decisamente maggiore del tirante della corrente idrica o quando altri termini risultano essere dominanti (es. elevate resistenze al fondo). Il valore raccomandato per il coefficiente è di $1 \text{ m}^2/\text{s}$. Il secondo metodo è una approssimazione della formulazione di Smagorinsky, preferibile quando la dimensione delle celle è prossima o minore del tirante della corrente idrica. L'espressione utilizzata è la seguente:

$$\mu = C_s \sqrt{A_c} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2}$$

dove A_c è l'area della cella e C_s il coefficiente di Smagorinsky, che è convenzionalmente posto pari a 0.2.

La soluzione completa delle equazioni delle acque basse (Shallow Water Equations) si basa sull'algoritmo di Stelling (1984), fondato sul metodo implicito alle differenze finite, così come documentato da Syme (1991). La procedura computazionale, riportata in seguito, si divide in 2 fasi, ognuna delle quali comporta 2 steps, che richiedono la soluzione di una matrice diagonale di terzo ordine.

<u>STAGE - I</u>	<p>1° Step Risolve l'equazione del moto nella direzione Y per la velocità v, utilizzando un metodo iterativo, che richiede 2 sweeps. Per il primo sweep, il calcolo procede colonna per colonna nella direzione Y. Se il segno di tutte le velocità nella direzione X è lo stesso, il secondo sweep non è necessario, altrimenti il calcolo è ripetuto nella direzione opposta.</p> <p>2° Step Determina il tirante e la velocità u attraverso la soluzione delle equazioni di continuità e di moto nella direzione X. Nell'equazione di continuità viene esplicitato il termine della velocità in funzione dell'equazione di moto. Si determina così il tirante, che viene poi introdotto nell'equazione di moto per ricavare la componente della velocità. Questo processo è ripetuto per 2 iterazioni. Test su un numero di modelli hanno mostrato che ci sono pochi benefici ad utilizzare più di 2 iterazioni.</p>
<u>STAGE - II</u>	<p>Il secondo stage procede nella stessa maniera dello stage 1, ma nel primo step si utilizza l'equazione del moto della direzione x e nel secondo step sono impiegate l'equazione di continuità e l'equazione del moto nella direzione Y.</p>

Analisi di taratura del modello idrologico della Lama Balice

Lo studio è stato condotto operando un'attenta ed onerosa analisi di taratura del modello di calcolo idrologico (SCS-CN), rispetto all'evento del giugno 2014.

E' noto che il regime torrentizio delle piene del reticolo carsico pugliese e le caratteristiche morfologiche dei corsi d'acqua, è tale da rendere molto complessa un'analisi di taratura. Nella pratica non esistono stazioni di misura di portata o dei livelli idrici nei corsi d'acqua, sia per le azioni veementi che le piene potrebbero avere sugli strumenti di misura, sia sulla bassissima frequenza di eventi nello stesso corso d'acqua. Ciò di fatto ha reso anti-economica l'installazione di strumentazione in alveo e conseguentemente non si dispongono di misure di portata nelle aree carsiche pugliesi.

L'unica strada che resta per operare analisi di taratura è quella di osservare i fenomeni che si verificano, operare misure dei livelli lasciati dal passaggio delle piene su elementi fissi interni al corso d'acqua (es. pile di un ponte) e cercare la correlazione degli effetti al suolo con il dato pluviometrico registrato nelle stazioni pluviometriche.

Si è fatto pertanto riferimento ai dati di pioggia resi disponibili dal centro funzionale di protezione civile della regione Puglia ed ai segni lasciati dal transito della piena, osservati immediatamente dopo l'evento del 16-17-18 giugno 2014 nel territorio della provincia di Bari. Si è provveduto, quindi, alla costruzione di un modello idrologico, realizzato secondo le metodologie usualmente adoperate da questa Autorità per le analisi sul territorio carsico murgiano, operando la calibrazione di alcuni parametri (es. Curve Number) con riferimento specifico al bacino idrografico della lama Balice.

Dati pluviometrici

Si specifica che i dati pluviometrici sono stati richiesti da questa Autorità di Bacino tramite nota prot. n.4068 del 27/02/2017, per le stazioni di:

STAZIONI	PERIODO (Giorno - Mese - Anno)
Bari – Osservatorio	11-18 Giugno 2014
Castel del Monte	11-18 Giugno 2014
Corato	11-18 Giugno 2014
Grumo Appula	11-18 Giugno 2014
Masseria Modesti	11-18 Giugno 2014
Quasano	11-18 Giugno 2014
Ruvo di Puglia	11-18 Giugno 2014

A questi dati si sono aggiunti i dati relativi alla stazione pluviometrica di Bitonto, noti dal report della protezione civile denominato "I FENOMENI TEMPORALESCHI DEL 16-17-18 GIUGNO 2014 NEL TERRITORIO DELLA PROVINCIA DI BARI".

I dati pluviometrici sono stati richiesti per le stazioni pluviometriche i cui topoi intersecano il bacino della Lama Balice a partire dall'11 Giugno e non dal 16 Giugno, primo giorno dell'evento di pioggia, perché potessero essere

valutate le condizioni di umidità del terreno antecedenti al verificarsi dell'evento (16-17-18 Giugno) e la conseguente attitudine a generare deflusso del bacino studiato.

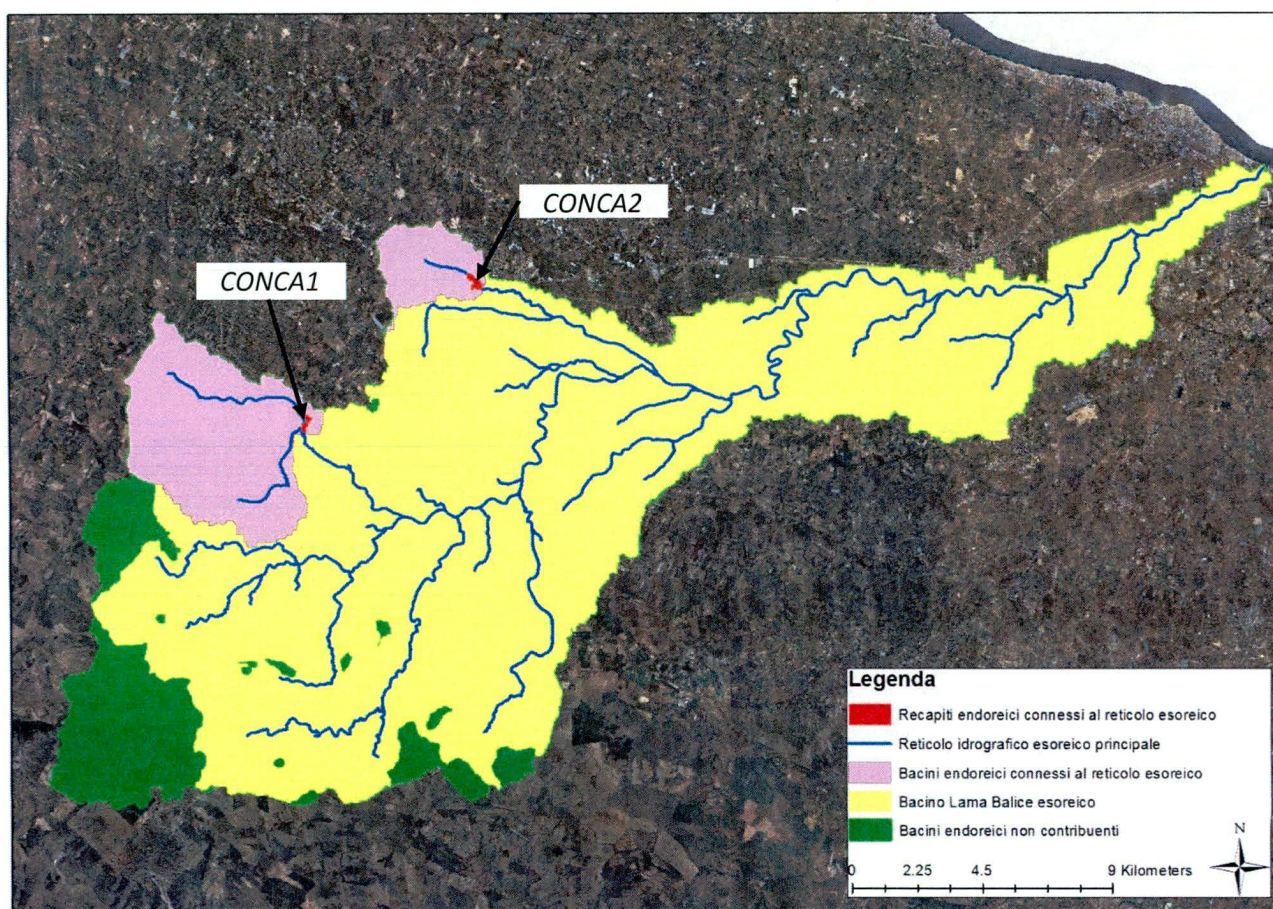
Analisi morfometrica – applicazione al caso in esame

L'analisi morfometrica e la definizione dei bacini idrografici è stata eseguita interpolando le linee di livello e i punti quotati al suolo della CTR Puglia 1:5000. Tramite tale DTM, è stato delineato il bacino idrografico complessivo e i sottobacini di studio con relative caratteristiche morfologiche.

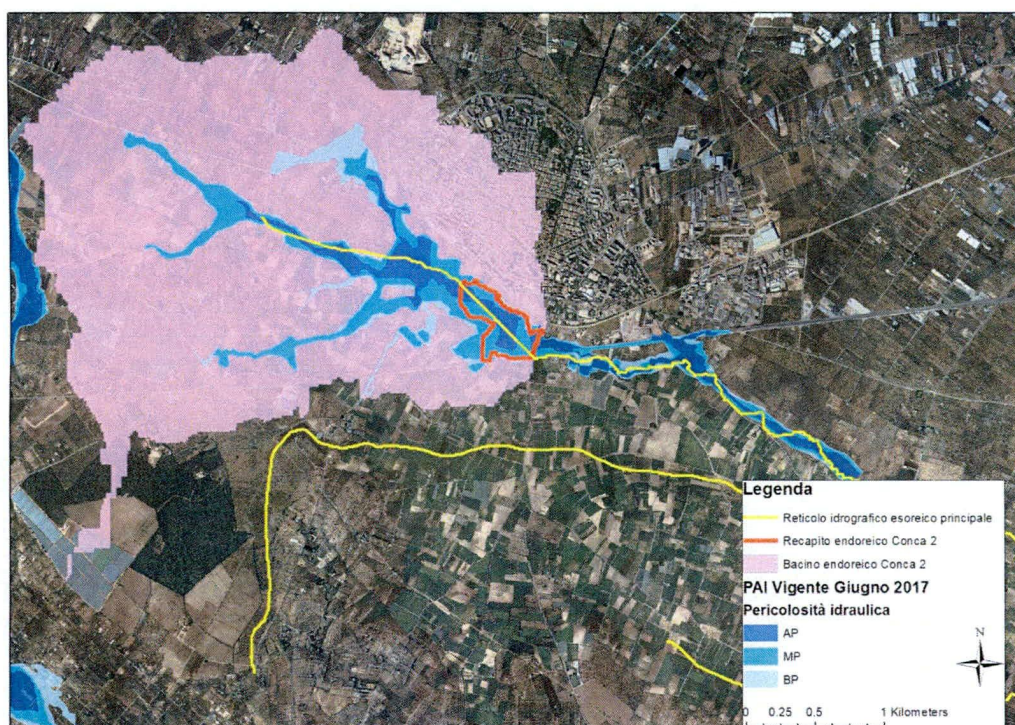
Riguardo il calcolo dell'area contribuyente alla sezione di chiusura terminale del bacino della Lama Balice, è opportuno rappresentare come siano stati esclusi i sistemi endoreici ritenuti non connessi idraulicamente al reticolo esoreico, sulla base di studi già effettuati da questa Autorità e rappresentati nel vigente PAI.

In particolare si è rilevata, da analisi di perimetrazioni idrauliche di PAI vigente e studi idraulici disponibili, la presenza di due bacini endoreici, denominati Conca1 e Conca2, che in occasione di eventi di significativo tempo di ritorno possono contribuire idraulicamente ai deflussi esoreici.

Nell'immagine seguente si rappresenta graficamente il risultato delle analisi effettuate:



Valutazioni sul bacino idrografico della Lama Balice: evidenza dei sottobacini che hanno parziale recapito in depressioni morfologiche significative



Esempio Bacino endoreico (Conca 2) contribuente al reticolo esoreico con PAI Vigente, Ruvo di Puglia

Come esposto nella figura 2 nella pagina precedente, nel caso in esame, relativo alla Conca 2, i deflussi rimangono contenuti nella conca per tempi di ritorno di 30 anni (Alta pericolosità idraulica AP), ma alimentano un reticolo esoreico posto più a valle della conca, per eventi con tempo di ritorno di 200 anni (MP) e 500 anni (BP).

Si riportano di seguito le principali caratteristiche morfologiche del bacino idrografico della Lama Balice considerato, ovvero bacino esoreico e bacini endoreici connessi al sistema esoreico per tempi di ritorno straordinari.

CARATTERISTICHE FIOGRAFICHE DEL BACINO DI STUDIO CHIUSO ALLA FOCE					
Area contribuente (Km ²)	Pendenza media del bacino $i_m(\%)$	Quota minima del bacino $Q_{min}(m\ s.l.m.)$	Quota massima del bacino $Q_{max}(m\ s.l.m.)$	Quota media del bacino $Q_{ave}(m\ s.l.m.)$	Lunghezza dell'asta principale del bacino $L_{max}(Km)$
339.61	4.84	0.34	635.00	316.87	61.54

Per le successive operazioni di modellazione idrologica e trasformazione afflussi-deflussi si è operato una suddivisione del bacino complessivamente considerato in sottobacini di studio e tratti di reticolo.

Di tali elementi sono state determinate le caratteristiche morfologiche utili a caratterizzare le successive fasi di modellazione, meglio descritte nei paragrafi successivi, mediante software HEC-HMS (acronimo di Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modelling System, software prodotto dallo US ARMY engineering corps <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>), utilizzando i seguenti approcci modellistici:

- loss method: modello Curve Number – Soil Conservation Service (ora NRCS);
- transform method: Hunit Hydrograph – NRCS, standard peak rate factor (PRF484);
- routing method: Lag.

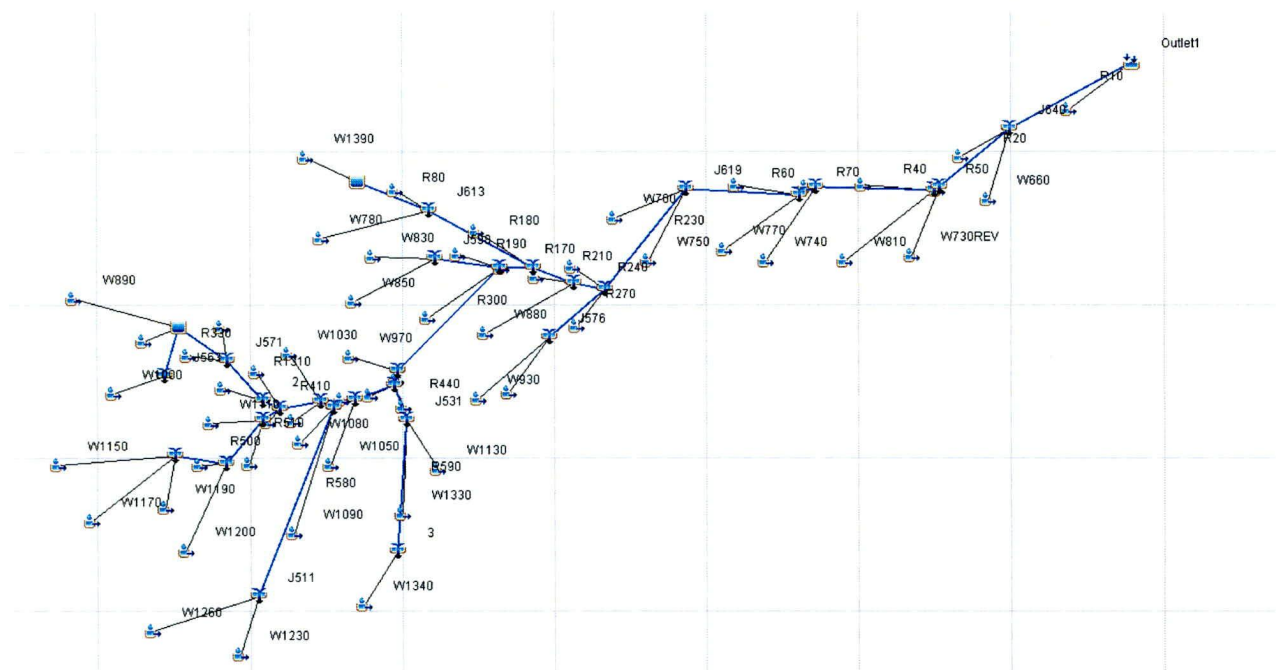
Utilizzo del software HEC-HMS per il calcolo degli idrogrammi di piena dell'evento del giugno 2014

Il bacino della Lama Balice è stato modellato come detto tramite software HEC-HMS e schematizzato secondo i seguenti elementi:

- N. 58 "Subbasin" o sottobacini
- N.28 "Junction" o connessioni tra i sottobacini
- N.2 "Reservoir" o conche endoreiche
- N.65 "Reach" o aste fluviali

Inoltre:

- I dati di precipitazione sono quelli registrati dalle stazioni pluviometriche citate nel relativo paragrafo spazializzati sui sottobacini con il metodo dei topoi (poligoni di Thiessen);
- La stima delle perdite idrologiche è stata condotta tramite metodo SCS CN;
- Nella prima fase di costruzione del modello (Ante Calibrazione) si sono caratterizzati i sottobacini analizzati estrapolando i valori relativi medi di CNII dalla "mappa del CN2013" redatta dalla STO di quest'Autorità di Bacino nell'ambito del PO-FESR 2007-2013;
- Il metodo di trasformazione afflussi deflussi è basato sull'idrogramma unitario SCS (PRF Standard484).
- Il deflusso nelle aste fluviali è basato sul metodo Lag Time determinato stimando velocità di moto uniforme secondo la formula di Chezy e lunghezza delle aste;
- I dati morfologici inputati, come detto, sono quelli ricavati dal DTM ricostruito da curve di livello e punti quotati della CTR Puglia;



Schema concettuale HEC-HMS del bacino di studio della Lama Balice

Nella suddivisione in sottobacini si è tenuto in debito conto il dominio di applicabilità del metodo del Soil Conservation Service Curve Number (max 15-20 km² secondo Ferro *Sistemazione dei Bacini Idrografici*), si sono inoltre inserite sezioni di chiusura nei:

- punti di taratura (ove disponibile il dato del tirante massimo rilevato);
- strade, ferrovie ed infrastrutture a rete di particolare importanza;
- intersezione con aree particolarmente antropizzate;
- significativi cambi di pendenza;

Si riportano di seguito le tabelle con le caratteristiche degli input modellistici descritti, con riferimento alla figura precedente:

Nome Sottobacino	CN II mappa AdB	BasinSlope	T ritardo[min]	T corrivaz.[min]	Elev mean[m]	Area [km2]	LfP [Km]
W1000	74.17	3.13	133.5	222.5	424.79	8.88	5.7
W1010	69.62	5.52	72.05	120.08	295.8	1.68	3.21
W1020	71.8	6.46	49.93	83.21	293.58	1.07	2.42
W1030	67.38	3.49	144.42	240.7	329.52	6.04	5.34
W1040	64.77	5.89	45.21	75.35	303.18	0.75	1.59
W1050	62.51	6.22	144.4	240.66	345.67	6.7	6.55
W1070	67.55	4.12	86.91	144.85	316.94	2.11	3.16
W1080	63.16	4.54	117.82	196.36	331.26	2.34	4.25
W1090	58.76	8.48	208.98	348.3	410.06	13.49	11.2
W1100	61.55	7.25	43.53	72.55	328.37	0.41	1.56
W1110	61.85	6.37	113.66	189.43	379.38	3.68	4.82
W1130	76.68	2.76	110.06	183.43	320.74	3.32	4.54
W1140	44.71	7.14	146.8	244.66	368.94	2.87	4.13
W1150	65.88	5.92	219.9	366.5	482.49	15.7	11.98
W1160	58.49	8.04	70.65	117.75	391.32	2.19	2.76
W1170	67.3	8.35	136.06	226.76	516.79	9.86	8.53
W1190	62.85	6.66	113.73	189.55	454.21	4.61	5.12
W1200	62.57	7.2	212.9	354.83	478.86	12.17	11.68
W1230	64.08	7.15	110.81	184.68	504.27	4.91	5.4
W1260	65.67	9.88	153.12	255.2	547.21	17.34	10.42
W1280	71.43	2.22	140.23	233.71	321.86	2.23	4.46
W1290	55.08	7.3	114.59	190.98	353.85	2.74	4.28
W1330	70.06	5.68	148.41	247.35	349.49	10.81	8.2
W1340	58.22	9.22	133.85	223.08	451.65	11.59	6.64
W1380	77.47	2.57	102.94	171.56	229.27	1.91	4.11
W1390	74.69	2.71	142.35	237.25	248.54	8.34	5.76
W640	72.33	5.95	123.09	205.15	37.05	5.8	7.22
W650	68.86	4.89	116.76	194.6	72.91	5.1	5.31
W660	71.84	2.47	170	283.33	80.99	5.63	6.14
W670	69.88	2.73	209.82	349.7	138.63	6.26	7.95
W680	77.94	4.71	113.68	189.46	104.75	4.16	6.91
W700	68.58	2.44	195.83	326.38	183.32	5.79	6.51
W710	76.28	5.75	21.42	35.7	115.89	0.21	0.91
W720	74.21	14.58	6.6	11	77.81	0.04	0.34
W730	68.84	1.82	135.69	226.15	111.86	3.75	7.6
W740	68.87	2.68	196.3	327.16	158.83	5.17	6.98
W750	71.68	4.13	205.29	342.15	183.48	8.93	10.66
W770	68.75	2.25	248.51	414.18	165.36	7.94	8.39
W780	70.76	3.65	219.17	365.28	280.49	12.62	10.38
W790	77.34	2.61	139.79	232.98	217.32	4.97	6.06

W810	69.36	2.36	263.69	439.48	135.92	16.53	9.5
W820	83.8	2.01	80.39	133.98	220.42	1.47	3.32
W830	74.39	3.26	148.25	247.08	253.04	4.83	6.73
W840	81.65	1.99	77.22	128.7	212.07	0.72	2.88
W850	68.41	4.99	147.82	246.36	291.24	5.51	7.12
W860	81.01	3.1	82.82	138.03	207.8	1.89	4.03
W870	72.27	4.09	194.56	324.26	255.34	10.51	10.1
W880	72.38	2.89	215.2	358.66	249.54	7.21	9.26
W890	65.15	5.1	236.44	394.06	382.9	19.8	11.66
W900	77.03	2.17	110.06	183.43	203.87	2.75	3.95
W910	73.87	3.68	96.95	161.58	215.25	2.86	4.19
W920	67.98	6.11	83.73	139.55	377.91	3.9	3.91
W930	71.75	3	235.89	393.15	284.74	7.66	10.41
W940	69.66	4.33	121.72	202.86	272.74	4.85	5.33
W950	66.16	2.57	115.49	192.48	336.74	3.13	3.21
W960	67.98	6.24	90.1	150.16	354.54	2.35	3.46
W970	67.17	4.33	105.97	176.61	306.33	3.36	4.12
W980	71.84	8.04	18.64	31.06	276.19	0.19	0.81

Nome asta fluviale	ElevUP_HMS [m]	ElevDS_HMS [m]	RivLen_HMS [m]	Slp	Vel [m/s]	LAG time [min]
R10	39.8	1.07	5485.73	0.007	2.10	43.52
R100	91.87	70.51	1216.54	0.0175	3.31	6.12
R110	103.43	69.14	2764.13	0.0124	2.78	16.55
R120	140.16	106.41	2427.63	0.0139	2.95	13.73
R130	118.78	103.43	2285.28	0.0067	2.05	18.59
R1310	320.76	312.87	2390.11	0.0033	1.44	27.73
R1350	448.93	366.3	4070.33	0.0203	3.56	19.04
R140	289.15	218.55	6508.25	0.0108	2.60	41.66
R1400	239.4	232.35	2419.87	0.0029	1.35	29.88
R150	157.49	111.11	3985.55	0.0116	2.70	24.63
R160	234.02	222.5	2079.93	0.0055	1.86	18.63
R170	208.12	200.48	1446.35	0.0052	1.82	13.26
R180	218.55	200.48	4693.7	0.0038	1.55	50.44
R190	222.5	208.12	2753.52	0.0052	1.81	25.40
R20	70.51	39.8	4215.31	0.0072	2.13	32.93
R200	129.7	103.43	2115.48	0.0124	2.79	12.66
R210	200.48	194.47	1634.7	0.0036	1.52	17.98
R220	258.89	222.5	2942.99	0.0123	2.78	17.64
R230	188.75	140.37	9180.67	0.0052	1.81	84.31
R240	194.47	188.75	1258.37	0.0045	1.69	12.45
R250	231.1	194.47	3362.26	0.0108	2.61	21.47
R260	352.04	333.92	6458.93	0.0028	1.32	81.30
R270	220.33	188.75	3032.48	0.0104	2.55	19.81
R280	333.92	320.76	2343.01	0.0056	1.87	20.84
R290	319.84	320.76	176.16	0.001	0.79	3.71
R30	73.65	39.8	2431.13	0.0139	2.95	13.74
R300	262.54	208.12	8158.32	0.0066	2.04	66.59
R310	249.93	220.33	1921.07	0.0154	3.10	10.32
R320	279.13	262.54	987.57	0.0167	3.24	5.08
R330	394.54	333.92	2778.09	0.0218	3.69	12.54
R340	396.22	394.54	52	0.0322	4.49	0.19
R350	266.9	262.54	515.07	0.0084	2.30	3.73
R360	412.06	394.54	2108.52	0.0083	2.28	15.42
R370	281.69	266.9	1764.17	0.0083	2.29	12.85
R380	288.67	220.33	5443.17	0.0125	2.80	32.38

R390	310.08	293.06	1589.33	0.0107	2.59	10.24
R40	106.41	69.14	5220.89	0.0071	2.11	41.19
R400	290.93	281.69	899.17	0.0102	2.53	5.91
R410	312.87	308.66	719.29	0.0058	1.91	6.27
R420	293.06	290.93	568.09	0.0037	1.53	6.18
R430	308.66	293.06	1729.09	0.009	2.37	12.14
R440	290.31	266.9	1791.15	0.013	2.86	10.44
R450	325.08	308.66	823.86	0.0199	3.53	3.89
R460	335.8	325.08	847.41	0.0126	2.81	5.02
R470	296.83	290.31	566.89	0.0115	2.68	3.52
R490	315.77	281.69	2779.82	0.0122	2.77	16.74
R50	69.14	70.51	214.39	0.001	0.79	4.52
R500	383.06	354.02	2265.52	0.0128	2.83	13.34
R510	354.02	325.08	2432.48	0.0118	2.73	14.87
R520	420.14	383.06	1715.03	0.0216	3.68	7.78
R530	469.34	383.06	7675.32	0.0112	2.65	48.26
R540	412.1	381.81	1094.94	0.0276	4.16	4.39
R550	446.86	420.14	1352.36	0.0197	3.51	6.41
R560	519.3	420.14	4067.31	0.0243	3.90	17.37
R570	503.64	354.02	6966.72	0.0214	3.66	31.69
R580	429.81	290.93	9397.95	0.0147	3.04	51.54
R590	366.3	290.31	6242.72	0.0121	2.76	37.72
R60	140.37	111.11	5737.21	0.0051	1.79	53.56
R600	551.37	486.67	3561.45	0.0181	3.37	17.62
R610	492.4	486.67	246.5	0.0232	3.81	1.08
R620	486.67	429.81	3661.6	0.0155	3.12	19.59
R630	479.39	429.81	2297.31	0.0215	3.67	10.43
R70	111.11	106.41	671.29	0.007	2.09	5.35
R80	232.35	218.55	3501.78	0.0039	1.57	37.18
R90	177.55	140.37	3192.41	0.0116	2.70	19.72

Riguardo la caratterizzazione delle conche endoreiche (conca 1 e conca 2) e dei loro possibili contributi al reticolo esoreico si sono stimate rispettivamente area e volume di riempimento.

È stato ipotizzato dunque che l'eccesso di volume accumulato nelle conche sfiori attraverso uno stramazzo a soglia larga stimato anch'esso sulla base della morfologia di ciascuna conca.

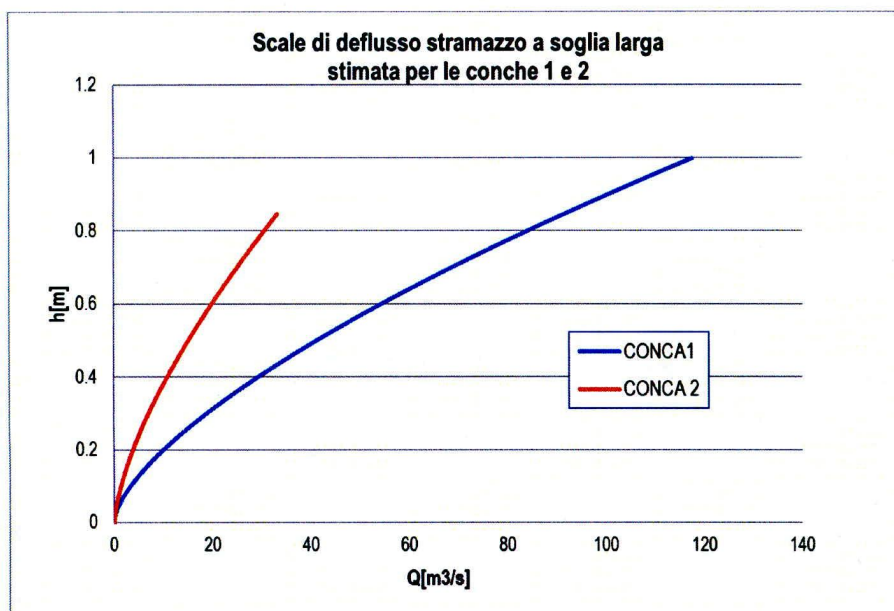
Di seguito si riporta l'equazione utilizzata per stimare come detto le portate sfiorate rispetto al volume accumulato in eccesso rispetto al volume di riempimento e i parametri morfologici stimati tramite procedure GIS per entrambe le conche:

$$Q = 1.705 \cdot I \cdot h^{1.5}$$

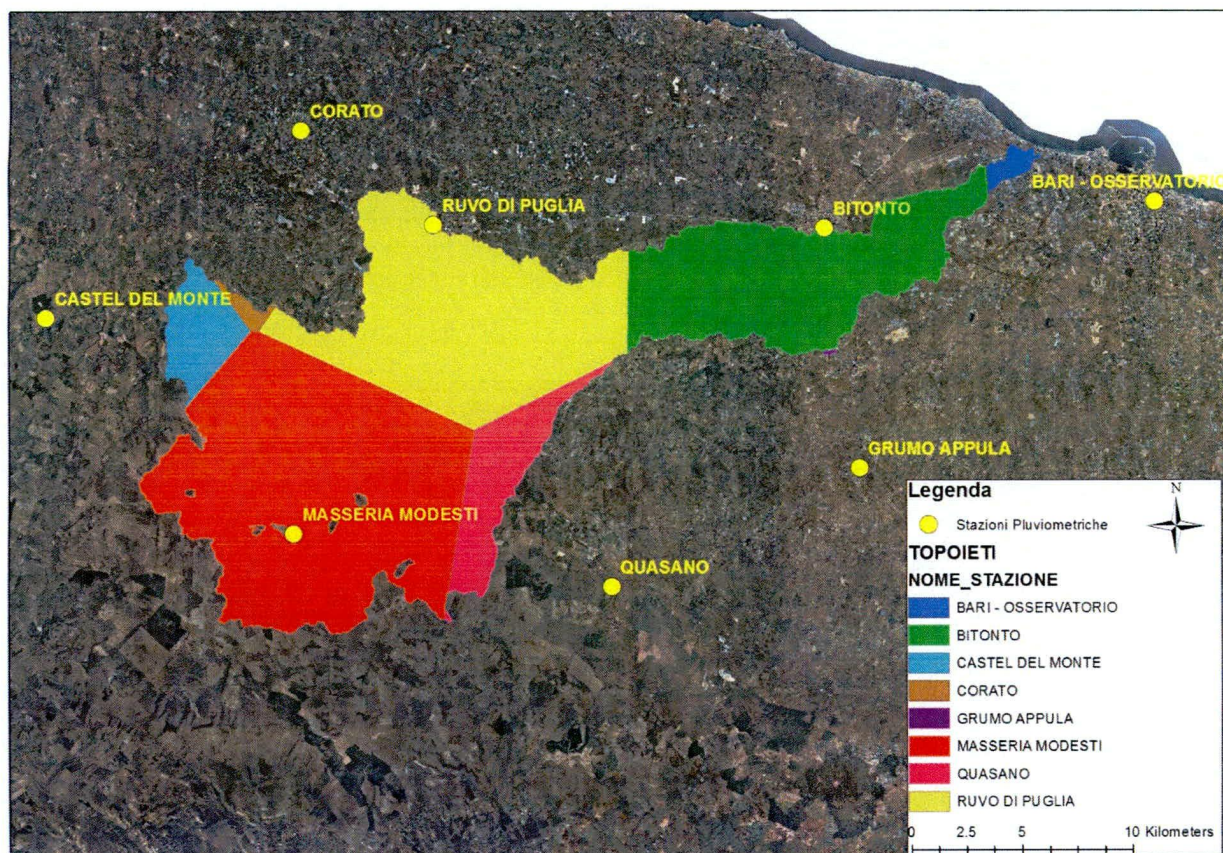
ID CONCA	AREA CONCA[m ²]	VOLUME RIEMPIMENTO [m ³]	LARGHEZZA STRAMAZZO[m]
1	183.090	90.763	70
2	105.129	223.046	25

Caratteristiche delle conche

Si riportano a titolo di sintesi le scale di deflusso ottenute secondo quanto specificato per entrambe le conche.

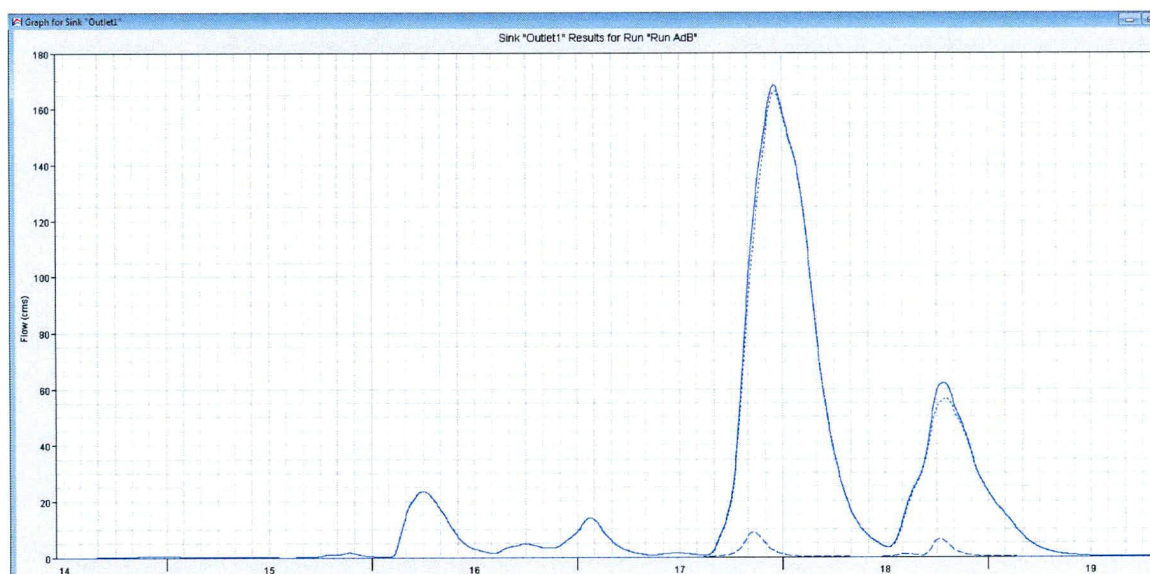


Di seguito nell'immagine si presenta la spazializzazione del dato puntuale registrato dalle stazioni pluviometriche tramite il metodo dei topoieti:



Spazializzazione del dato di pioggia tramite metodo dei topoieti

Il modello così impostato e nominato nel seguito “*Modello CNII AdB*”, ha prodotto i seguenti risultati in termini di idrogramma in prossimità della foce della Lama Balice:

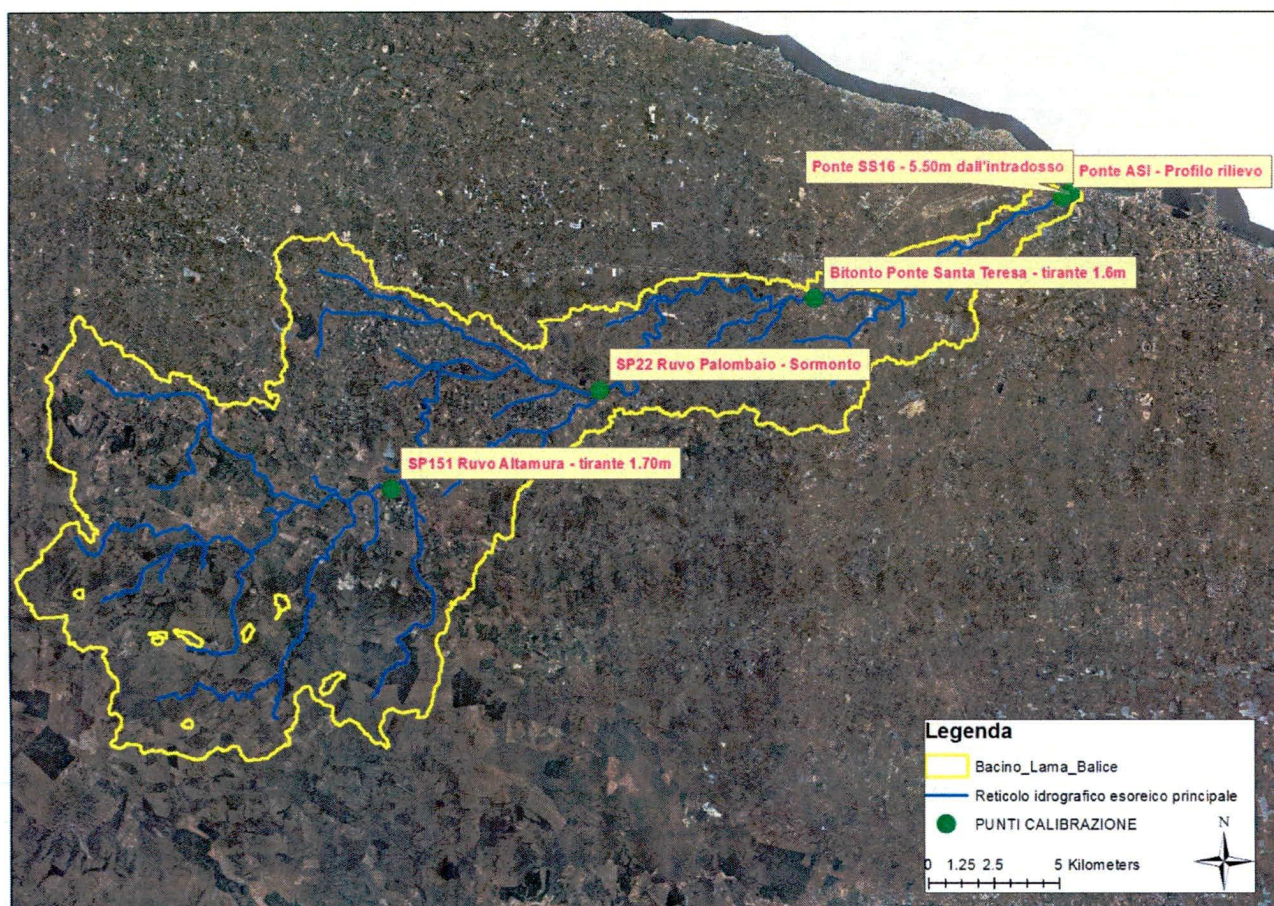


Idrogramma Foce Lama Balice riprodotto dal modello con CNII AdB , picco 168,4 m³/s alle 23:05 del 17 Giugno 2014

Effetti al suolo prodotti dalla piena del giugno 2014 e confronto con i valori simulati

Al fine di valutare i risultati forniti dal modello idrologico sopra descritto, con riferimento all'evento pluviometrico di giugno 2014, è stato effettuato un confronto fra i tiranti massimi simulati applicando i modelli idraulici 1D e 2D nei paragrafi precedenti richiamati e gli effetti al suolo prodotti dall'evento e misurati in campo dai funzionari di questa Autorità. Non essendo disponibili registrazioni idrometriche, si è fatto riferimento principalmente al verbale redatto dalla STO di quest'Autorità di Bacino prot. n. 13717 del 30/10/2014 oltre a video e altro materiale reperito online.

Nell'immagine seguente si presenta un inquadramento, all'interno del bacino, di alcune "sezioni di controllo" rispetto alle quali si sono osservati significativi segni conseguenti al transito della piena in esame:



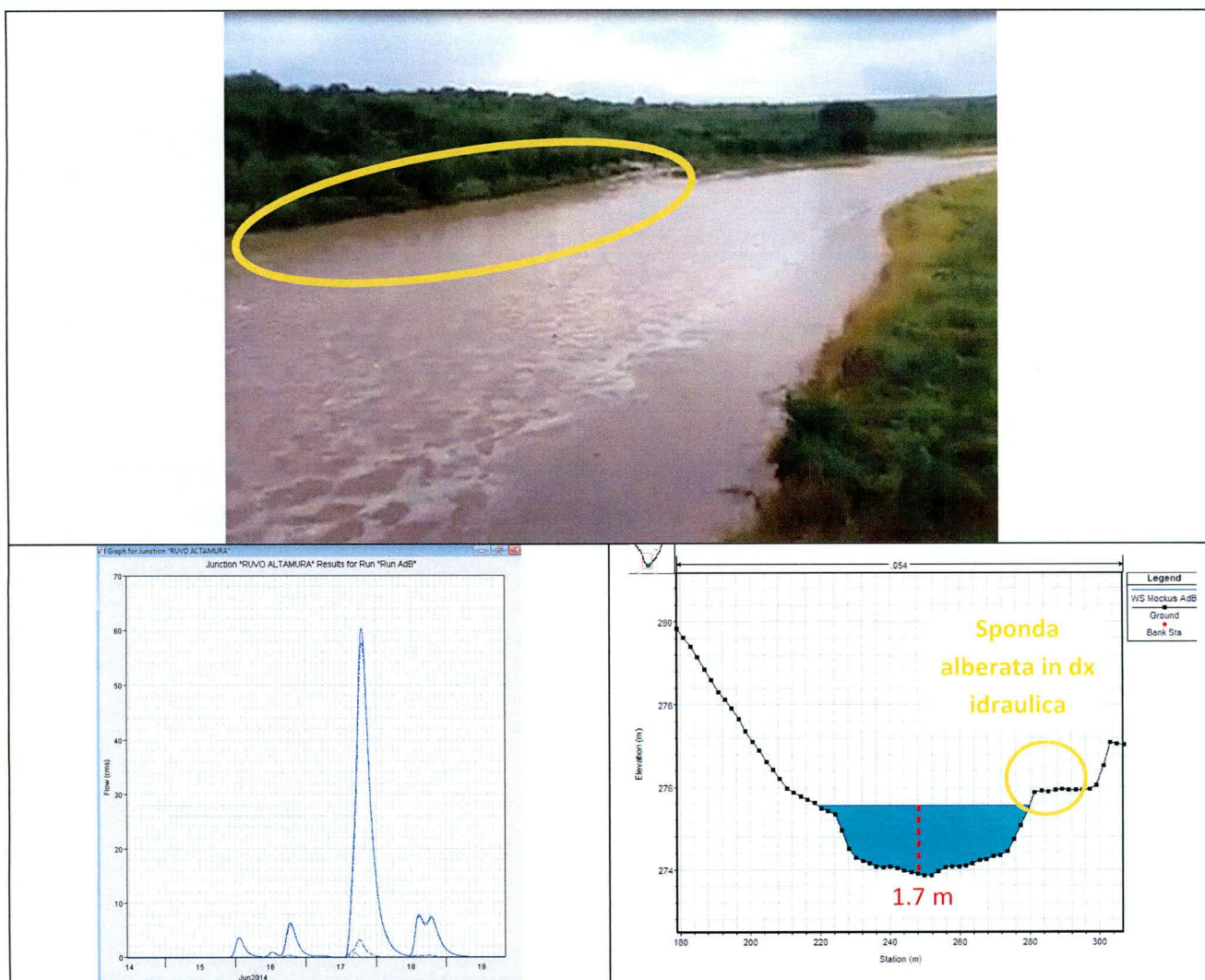
Sezioni di controllo con osservazioni post-evento utilizzabili per operazioni di calibrazione

Nelle tabelle esposte di seguito si rappresentano, allo scopo di meglio esplicitare il suddetto confronto, le seguenti informazioni per ciascuna sezione di calibrazione:

- ➔ Descrizione fotografica con lettura del massimo effetto al suolo registrato (tirante idrico massimo);
- ➔ Idrogramma simulato dal modello idrologico HEC-HMS descritto nel paragrafo precedente (CNII AdB) nel punto di controllo;
- ➔ Stima, attraverso modello idraulico (es. HEC-RAS monodimensionale, in moto permanente basato su sezioni LiDAR e valori di scabrezza da letteratura sulla base della carta di uso del suolo della regione Puglia), del valore di portata al colmo transitato localmente in corrispondenza dell'evento di piena e confronto rispetto a

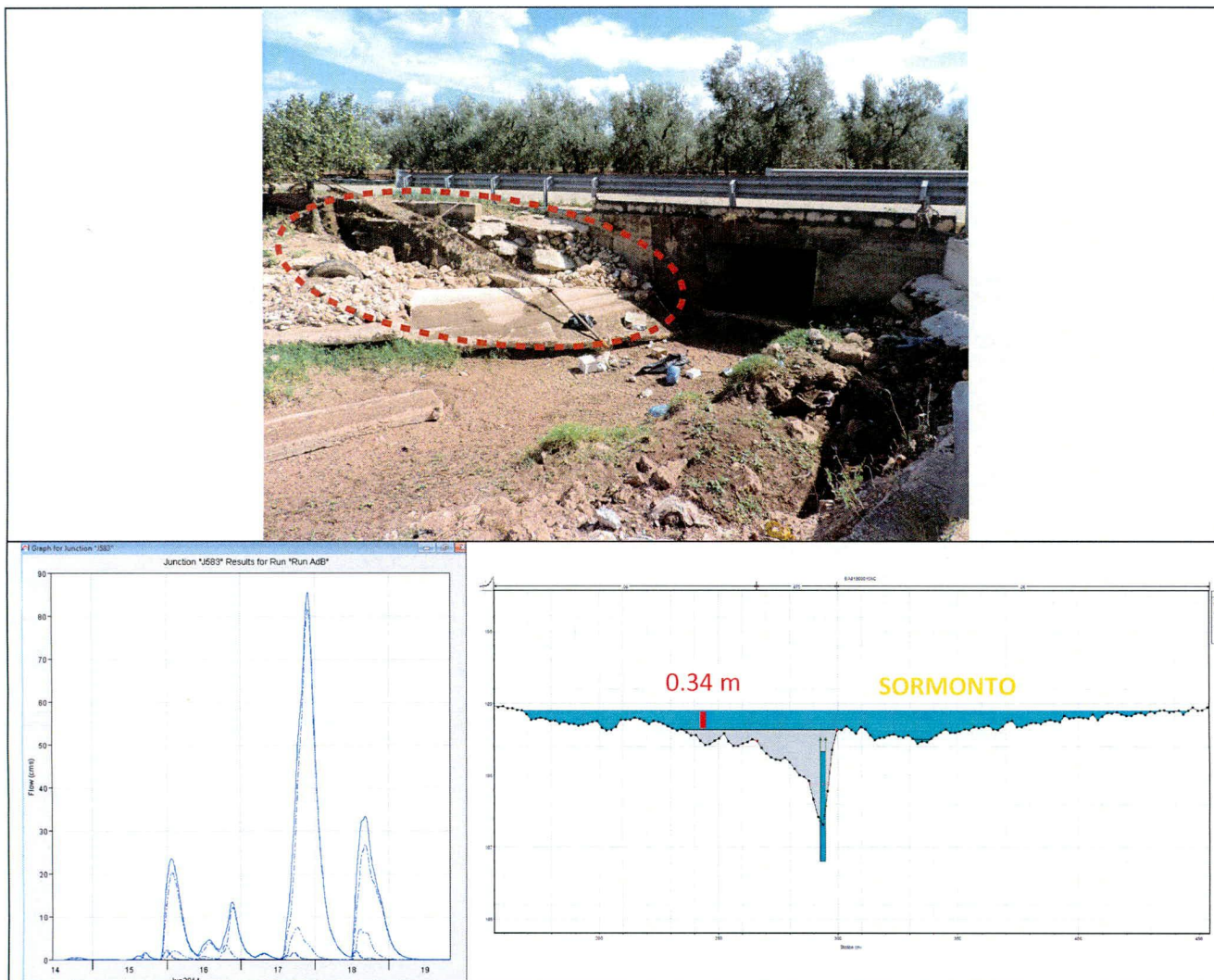
quello simulato dal modello HEC-HMS CNII AdB. (N.B. nel tratto di foce, viste le particolari condizioni, in la calibrazione è stata impostata tramite software TUFLOW-SMS in moto vario e con schematismo misto 1d-2d.

Punto n.1 - Screenshot da video – A monte dell'intersezione dell'asta principale della Lama Balice con la SP151 Ruvo-Altamura si osserva nel pomeriggio del 17 Giugno 2014 un tirante in transito stimato in **1,70 m** (riferimento la sponda alberata in dx idraulica non interessata dai deflussi). Il modello Hec-HMS CNII AdB rappresenta un idrogramma con un colmo di 60,4 m³/s simulati alle ore 19:15 del 17 Giugno. Inserendo tale input di portata nella modellazione idraulica in moto permanente su base Lidar, la simulazione restituisce un tirante in transito di **1,70 m**, del tutto compatibile con quello osservato nell'immagine sottostante.



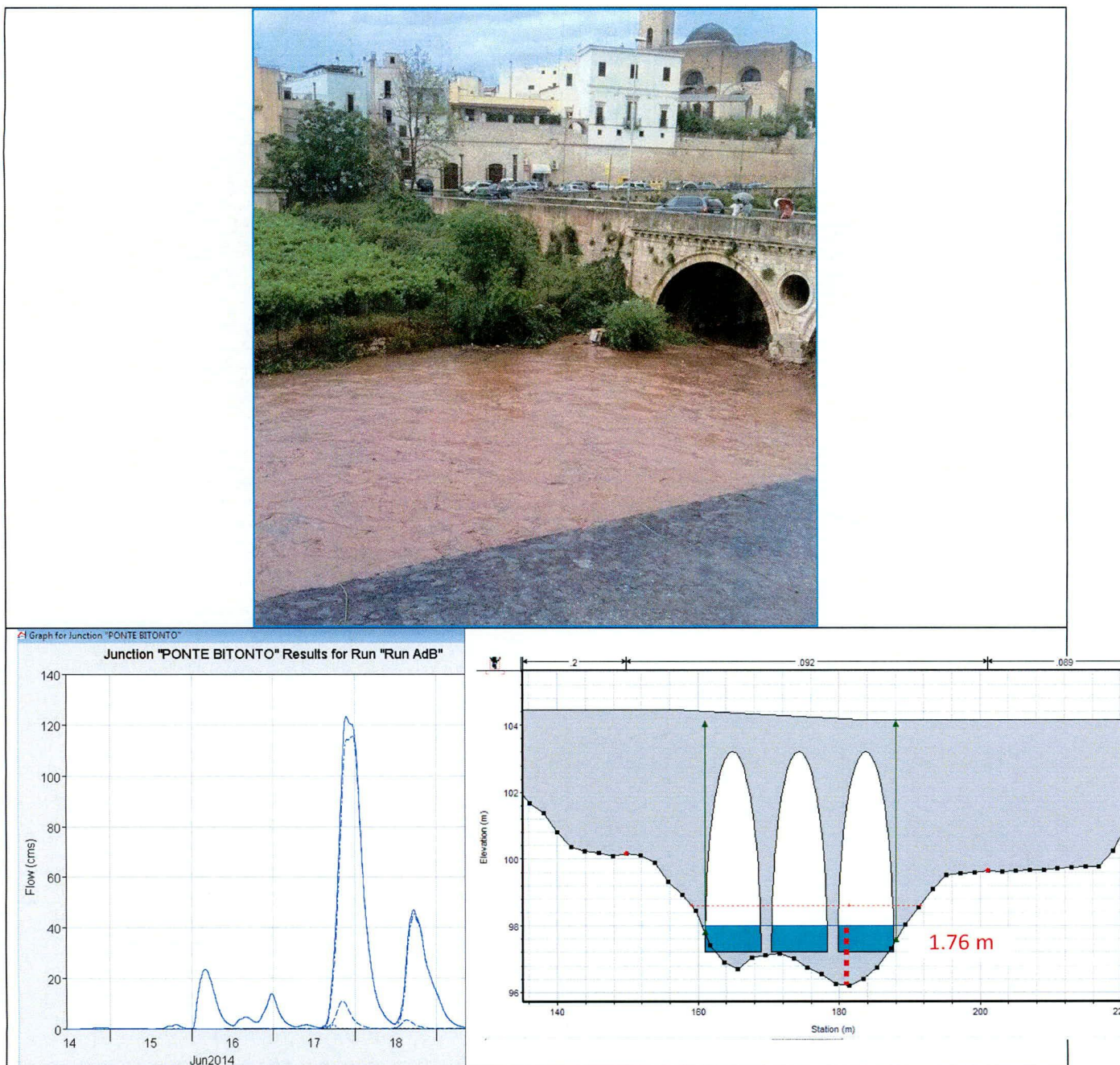
Confronto e calibrazione sezione SP151 Ruvo-Altamura

Punto n.2 - Sormonto della SP22 Ruvo-Palombaio – Dall'immagine si evincono evidenti segni di sormonto. Il modello Hec-HMS CNII AdB rappresenta un idrogramma con un colmo di $85,5 \text{ m}^3/\text{s}$ simulati alle ore 21:45 del 17 Giugno. Inserendo tale input di portata nella modellazione idraulica in moto permanente la simulazione restituisce un sormonto di **0,34 m** rispetto alla strada SP22.



Confronto e calibrazione sezione SP22 Ruvo-Palombaio

Punto n.3 - Segno del tirante sulla pila del ponte di Santa Teresa a Bitonto di 1,6 m dal fondo alveo. Il modello Hec-HMS CNII AdB rappresenta un idrogramma con un colmo di 123,2 m³/s simulati alle ore 21:35 del 17 Giugno. Inserendo tale input di portata nella modellazione idraulica in moto permanente la simulazione restituisce un tirante di di **1,76 m** rispetto alla pila del ponte.

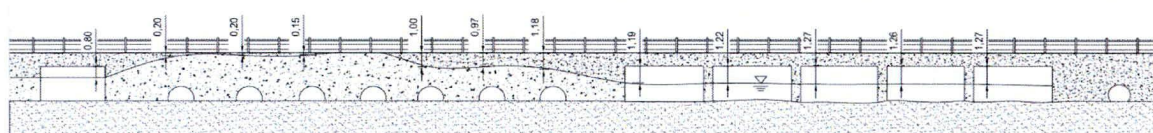


Confronto e calibrazione Ponte di Santa Teresa a Bitonto

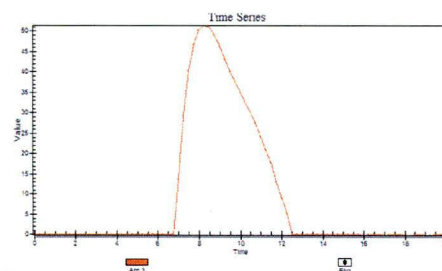
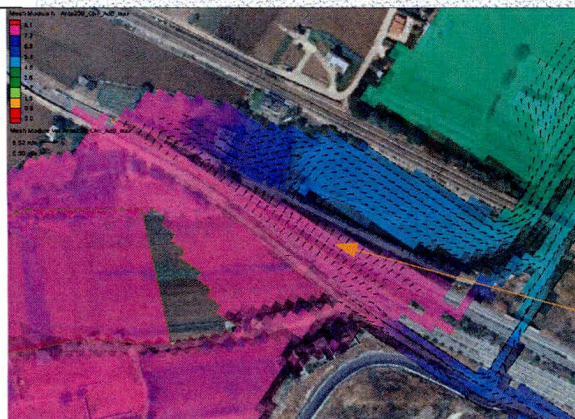
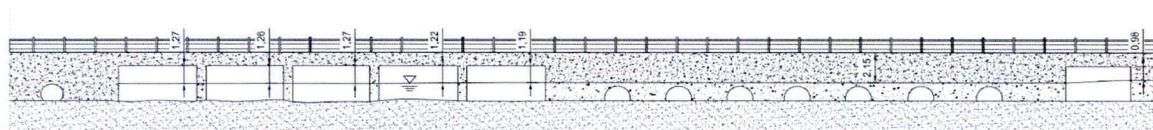
Punto n.4 - Segni del tirante al colmo sull'attraversamento Ponte Asi. Il modello Hec-HMS CNII AdB rappresenta un idrogramma con un colmo di $168,4 \text{ m}^3/\text{s}$ simulati alle ore 23:05 del 17 Giugno. Per tale valore di portata il modello idraulico TUFLOW-SMS in moto vario e con schematismo misto 1d-2d, rappresenta un sormonto dell'infrastruttura ferroviaria. Poiché tale sormonto non si è osservato in corrispondenza dell'evento si evidenzia la necessità di ricalibrare qualche parametro del modello per calibrare il modello alle osservazioni disponibili.



Sezione di monte



Sezione di valle



SORMONTO

Confronto e calibrazione Ponte ASI

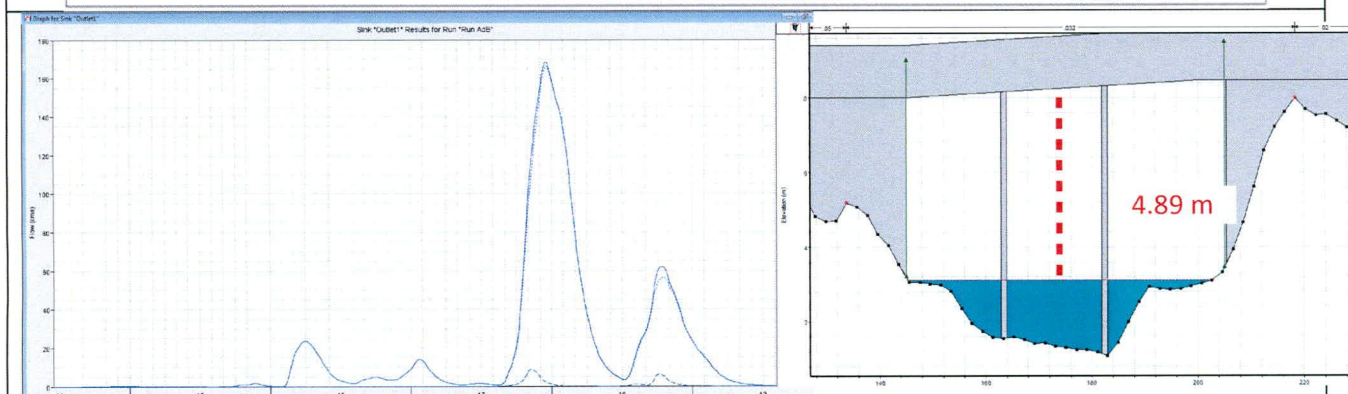
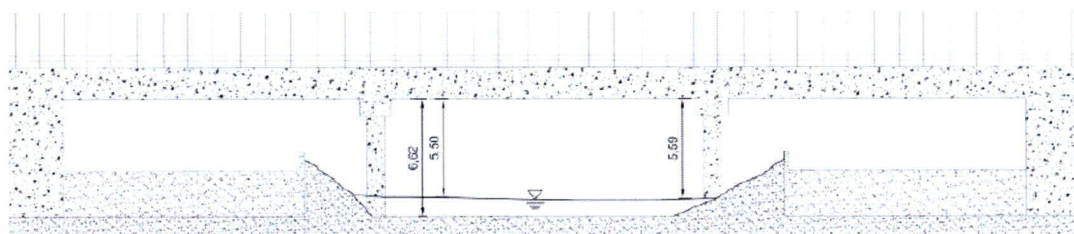
Punto n.5 - Segni del tirante al colmo sulle pile del ponte sulla SS16. Il modello Hec-HMS CNII AdB rappresenta un idrogramma con un colmo di 168,4 m³/s simulati alle ore 23:05 del 17 Giugno. Per tale valore di portata il modello idraulico riporta un tirante a 4,89 m dall'intradosso, diverso dai 5,5 m osservati.

Segni della piena di
Giugno 2014 rilevati
in sito



Attraversamento: BA01800018SS

Sezione di monte



Confronto e calibrazione Ponte SS16

Dalle analisi esposte in riferimento al confronto tra valori simulati dal modello idrologico e “osservate”, o meglio, stimate sulla base degli effetti al suolo rilevati localmente, si rileva che in prossimità della foce della lama la portata simulata risulta sensibilmente sovrastimata rispetto a quella transitata durante l'evento.

È stato pertanto stimato tramite modello Hec-Ras il valore di portata al colmo che permette di riprodurre idraulicamente il valore di tirante stimato sulla base degli effetti al suolo osservati.

Si propone di seguito una tabella di sintesi di confronto tra valori osservati e simulati dal modello nell'analisi idrologica condotta facendo riferimento ai parametri *Curve Number* di letteratura:

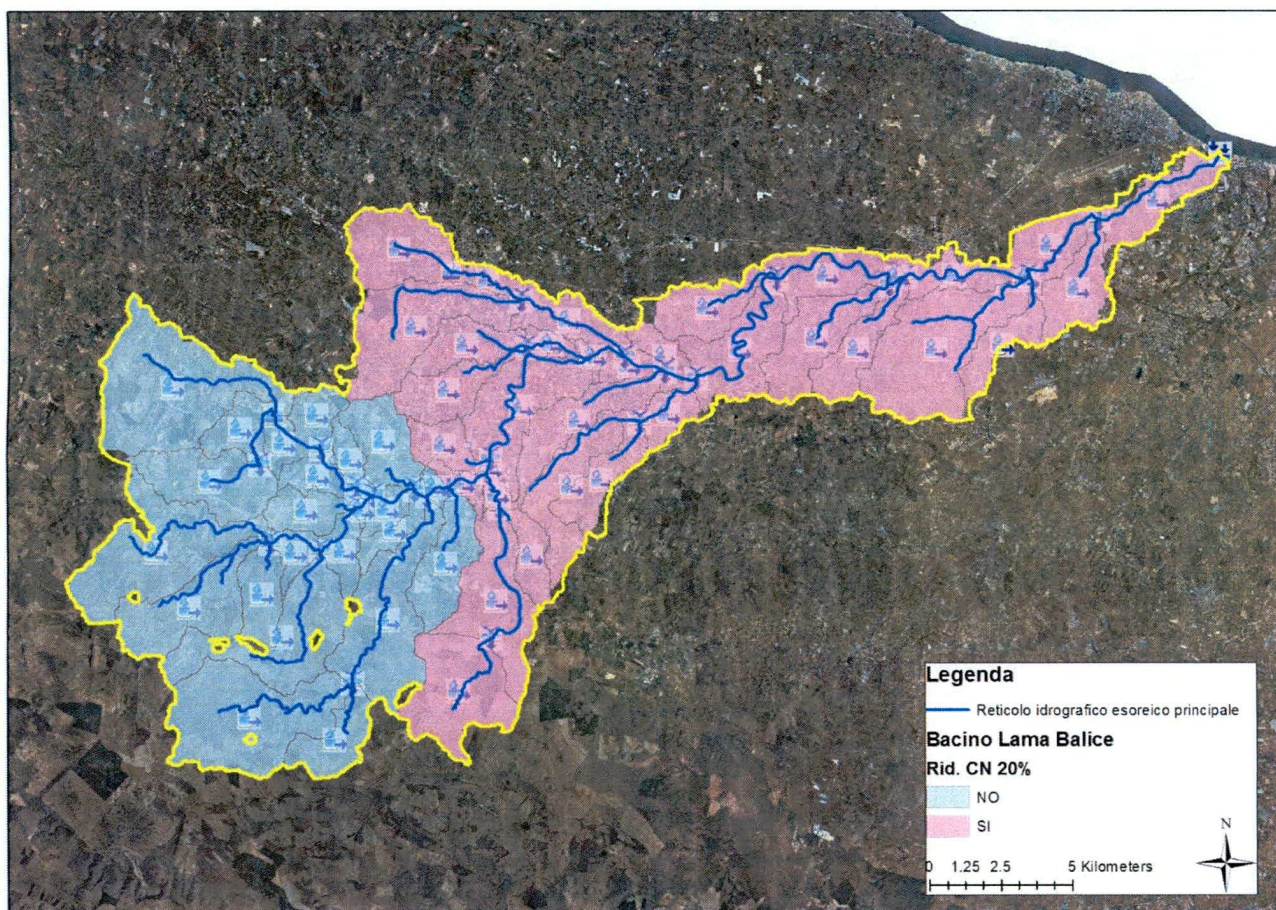
Sezione	Valori di Q al colmo [m³/s]	
	OSSERVATI (stimati tramite modello idraulico Hec-Ras)	SIMULATI da modello idrologico HEC-HMS CNII AdB
SP151 RUVO –ALTAMURA	60	60
SP22 RUVO-PALOMBAIO	70	85.5
BITONTO	85	123.2
PONTE DI SANTA TERESA	95	168.4
PONTE FERROVIARIO ASI	95	168.4
PONTE SS16	95	168.4

Confronto Valori di Q al colmo “osservati” e simulati dalla prima applicazione del modello idrologico Hec-HMS “CNII AdB”

A parte il primo punto, l'analisi condotta con i parametri di Curve Number ricavati dalla mappa predisposta da questa Autorità nel 2013, non hanno trovato apprezzabile coincidenza. Questo è ovviamente dipeso da diversi fattori, primo fra tutti la distribuzione spazio temporale della perturbazione che è molto diversa da quella rappresentata nei poligoni di Thiessen.

Un secondo fattore fortemente incidente è il valore di Curve Number. Nel caso in esame si sono condotte operazioni di variazione di detto parametro CN a valle della sezione dell'attraversamento sulla SP151, dove il modello forniva una buona corrispondenza (punto n.1).

In particolare il valore numerico del CN, in prima battuta nel modello “CNII AdB”, stimato sulla base di valori di letteratura ricavati dalla classificazione litologica e di uso del suolo della Regione Puglia, è stato ridotto del 20% per tutti i sottobacini a valle della Strada Provinciale Ruvo – Altamura.



Riduzione del CN del 20 % per i sottobacini della Lama Balice a valle della SP151 Ruvo Altamura

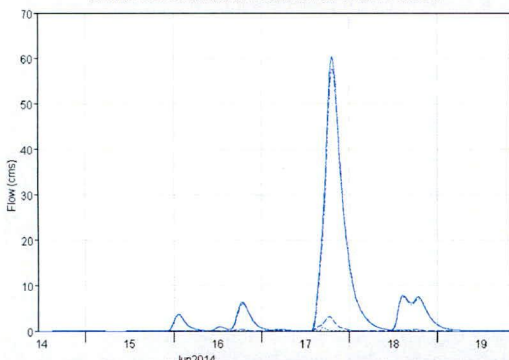
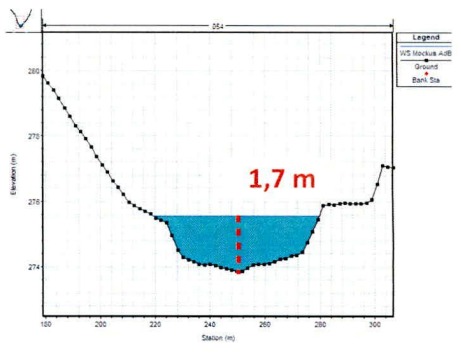
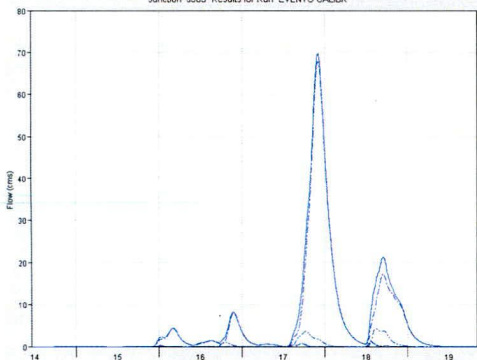
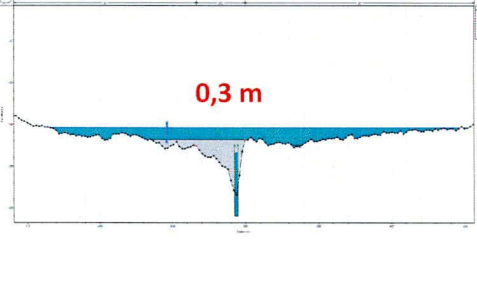
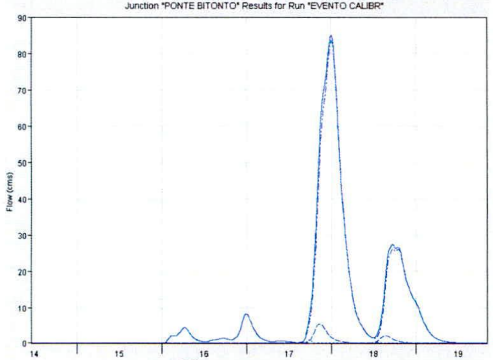
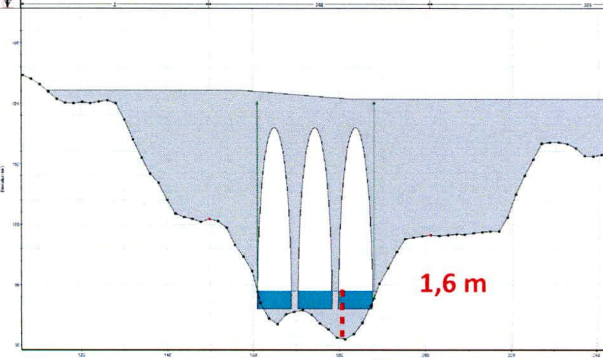
Lasciando invariati tutti gli altri parametri che rientrano nella modellazione idrologica descritta, operando quindi solo sul valore di Curve Number, il modello modificato, denominato *"Calibrazione Evento"*, ha prodotto per le sezioni di controllo i seguenti risultati:

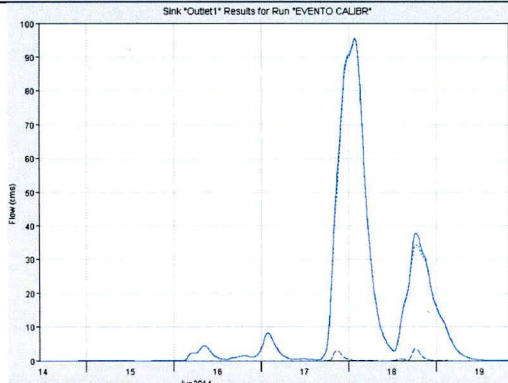
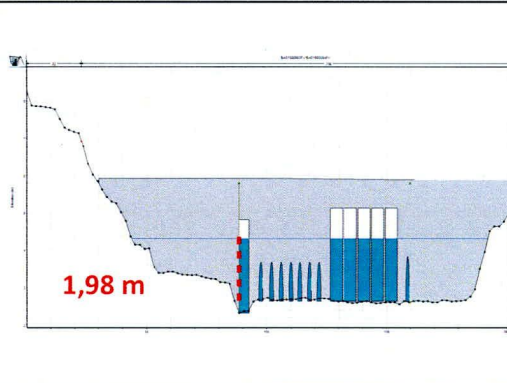
Sezione	Valori di Q al colmo [m ³ /s]		
	OSSERVATI (stimati tramite modello idraulico Hec- Ras) [m ³ /s]	SIMULATI da modello idrologico HEC-HMS "Calibrazione Evento"	
		Picco [m ³ /s]	Tempo di picco
SP151 RUVO – ALTAMURA	60	60.4	17 Giugno, 19:15
SP22 RUVO- PALOMBAIO	70	69.7	17 Giugno, 22:00
BITONTO PONTE DI SANTA TERESA	85	85.0	17 Giugno, 23:55
PONTE FERROVIARIO ASI	95	95.5	18 Giugno, 01:35
PONTE SS16	95	95.5	18 Giugno, 01:35

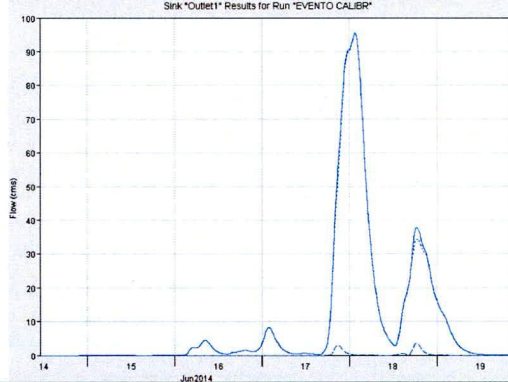
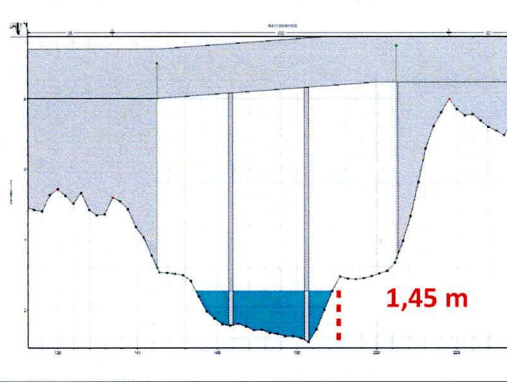
Confronto Valori di Q al colmo "osservati" e simulati da modello idrologico Hec-HMS "Calibrazione Evento"

Per quanto detto, sulla base dei dati disponibili e quindi dei valori di portata al colmo stimati nelle sezioni di controllo, risulta possibile considerare il modello implementato come rappresentativo della risposta idrologica del bacino della Lama Balice rispetto all'evento considerato.

Di seguito si riportano in tabella per ciascuna sezione di controllo, gli idrogrammi risultanti da modello idrologico HEC-HMS "Calibrazione Evento" e la sezione idraulica riprodotta in Hec-Ras con corrispondente valore di portata al colmo.

Sezione	Idrogramma Hec-HMS	Hec-RAS
SP151 RUVO ALTAMURA		
	Picco [m3/s]	H [m]
	60.4	1.70
SP22 RUVO PALOMBAIO		
	Picco [m3/s]	H [m]
	69.7	0.3 (Sormonto)
BITONTO PONTE DI SANTA TERESA		
	Picco [m3/s]	H [m]
	85.0	1.61
	Tempo di picco	V[m/s]
	17 Giugno, 19:15	0.83
	17 Giugno, 22:00	2.30
	17 Giugno, 23:55	3.03

PONTE FERROVIARIO ASI				
	Picco [m³/s]	Tempo di picco	H [m]	V[m/s]
	95.5	18 Giugno, 01:35	1.98	1.61

PONTE SS16				
	Picco [m³/s]	Tempo di picco	H [m]	V[m/s]
	95.5	18 Giugno, 01:35	1.45 (5.47 m dall'intradosso)	2.16

Risultati della calibrazione idrologica (Hec-HMS) e idraulica (Hec-Ras) del modello della lama Balice in rapporto all'evento del Giugno 2014

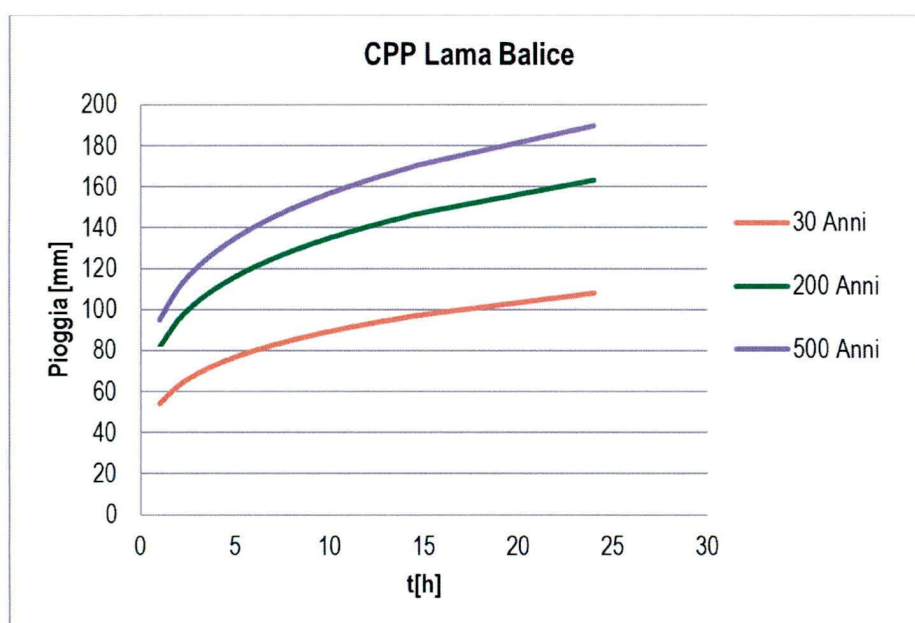
Stima della portata bicentenaria per la sezione di foce del bacino della lama Balice

L'analisi di calibrazione effettuata e descritta nel paragrafo precedente, ha consentito di definire i parametri idrologici del modello, in maniera da rendere la sua risposta quanto più vicina al reale meccanismo di formazione di una piena all'interno del bacino idrografico della lama Balice. In particolare si è operato sul valore del parametro CN, effettuando riduzioni nella porzione medio bassa del bacino idrografico. Pertanto il modello così definito è da ritenersi assolutamente rappresentativo della risposta idrologica del bacino.

Nell'ipotesi di stazionarietà della variabili statistiche che regolano la risposta idrologica del bacino esaminato, il modello definito può essere ragionevolmente applicato per valutare gli idrogrammi di piena che si genererebbero in occorrenza del verificarsi di una precipitazione con tempo di ritorno di 200 anni.

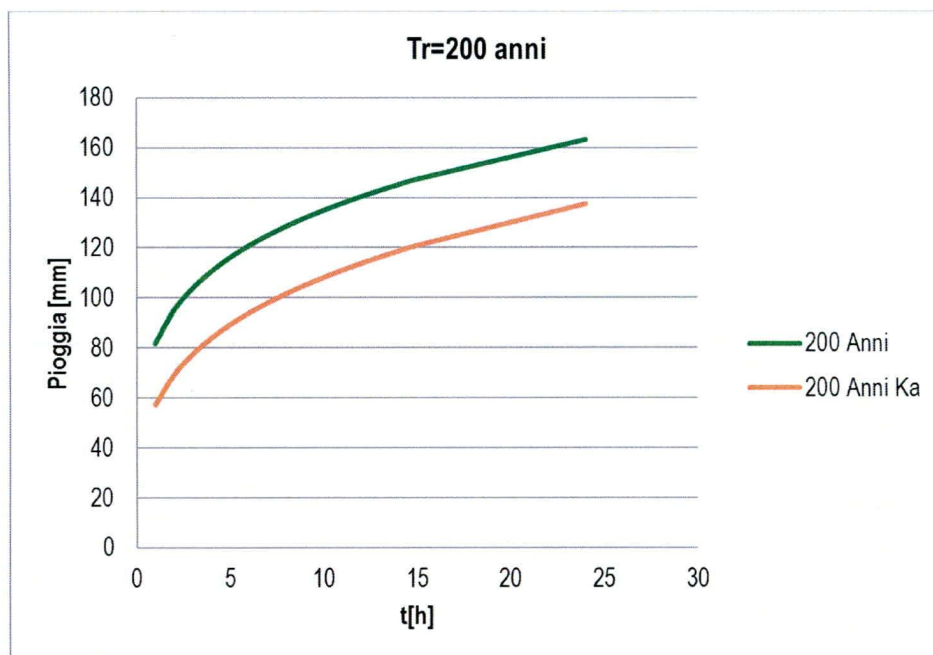
A tal fine, per la definizione della pluviometria di riferimento, si sono utilizzate le procedure di regionalizzazione fornite dalla metodologia propria del progetto VAPI Puglia CAP.9 (Copertino V., Fiorentino M. "Valutazione delle Piene in Puglia" CNR-GNDICI, Potenza, 1992)., descritte nei paragrafi precedenti, che ha suddiviso il territorio di competenza dell'Autorità di Bacino della Puglia in sei zone omogenee, con formulazioni delle Curve di Possibilità Pluviometrica (CPP) diverse per ognuna di esse.

Secondo il Va.Pi. il bacino della lama Balice ricade integralmente nella zona omogenea 5, per cui l'applicazione della metodologia consente di ricavare le curve di possibilità pluviometrica, così come riportate nel grafico seguente.

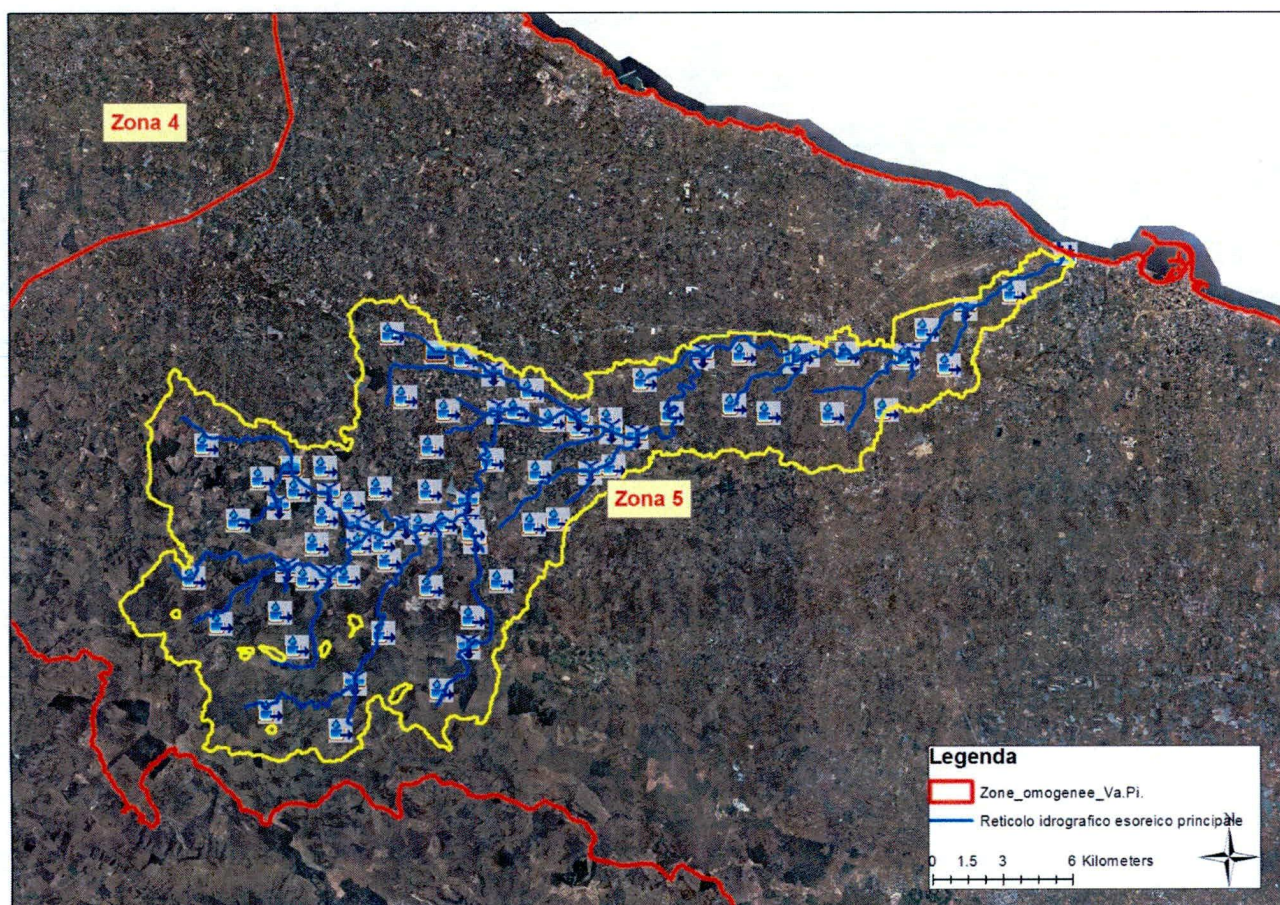


CPP Lama Balice Va.Pi. Zona 5

Facendo riferimento al solo Tempo di ritorno si riporta di seguito la CPP a 200 anni con relativa applicazione del K_a per le diverse durate di pioggia.

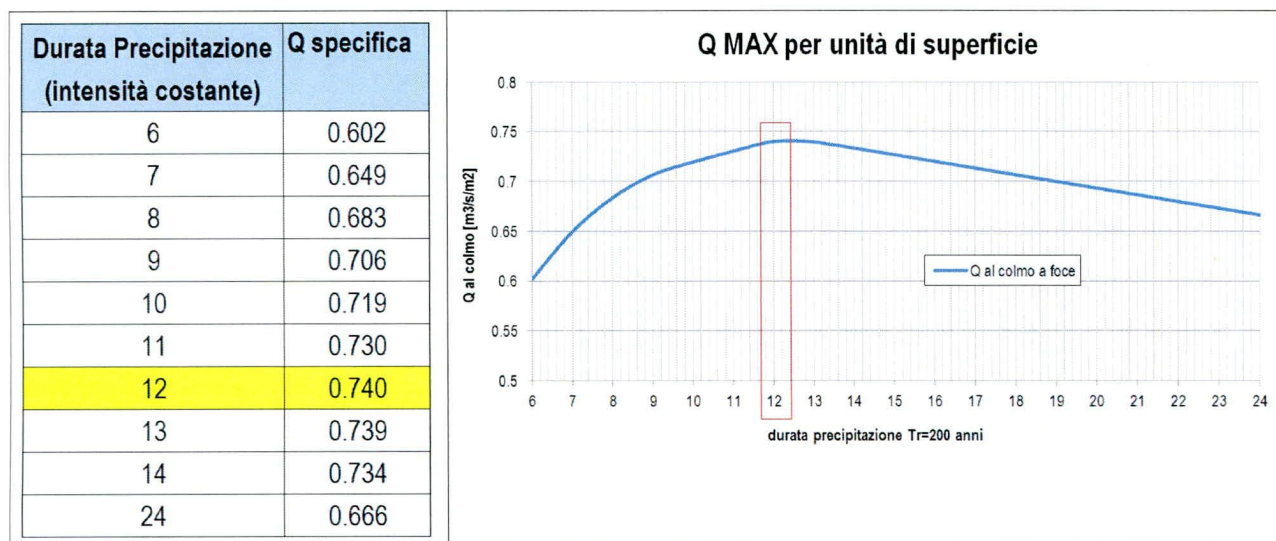


CPP 200 anni e applicazione K_a



Bacino della Lama Balice e zone omogenee Va.Pi.

Per stimare il tempo di corrivazione del bacino si sono inserite, come input al modello, le precipitazioni di diversa durata e di tempo di ritorno 200 anni ad intensità costante.



Per input di precipitazione bicentenaria a intensità costante, raggiugliate rispetto al K_a del bacino complessivo della lama Balice, Il valore Max di Q al colmo è dato per la durata di 12h (intensità pioggia costante di 9,48 [mm/h]).

Tale durata è stata ritenuta pertanto la durata critica del bacino complessivo della Lama Balice.

Una volta stabilita la durata critica del bacino oggetto di studio si sono ipotizzate diverse distribuzioni pluviometriche nell'arco delle 12h.

L'evento di durata critica di 12 h di tempo di ritorno di 200 anni (Va.Pi. Puglia) può essere suddiviso in eventi di durata inferiore, ottenibili dalla curva di possibilità pluviometrica precedentemente calcolata.

Nella tabella seguente sono riportati per le 12 h, i valori della CPP (Tr 200 anni) del bacino complessivo, quelli relativi alla CPP dopo aver applicato il K_a e infine i valori di millimetri cumulati di pioggia riferiti ad ogni ora.

Durata	mm CPP	CPP K_a	VALORI 1h
1	81.78	57.24	57.23
2	95.09	77.01	19.77
3	103.86	84.11	7.10
4	110.57	89.54	5.43
5	116.07	94.00	4.45
6	120.76	97.80	3.80
7	124.88	101.13	3.34
8	128.56	104.12	2.98
9	131.90	106.82	2.70
10	134.96	109.29	2.48
11	137.78	111.58	2.29
12	140.42	113.72	2.13

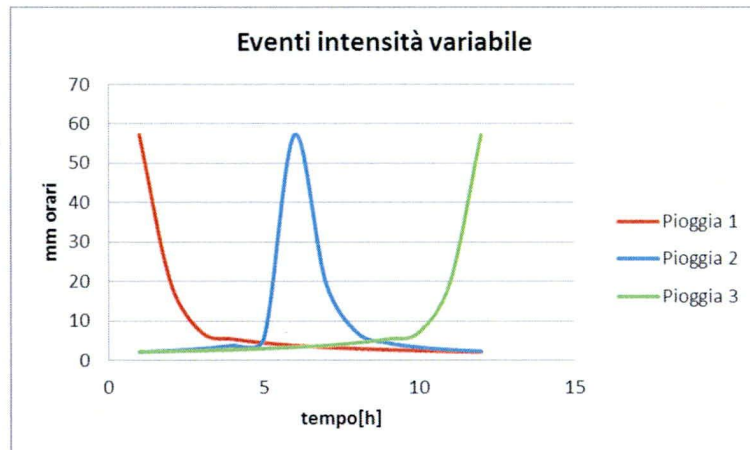
Suddivisione dell'evento di durata 12 h e Tr 200 anni (Va.Pi. Puglia) in eventi parziali orari

Una volta effettuata questa operazione si è suddiviso l'evento pluviometrico di progetto della durata di 12 ore e tempo di ritorno bicentenario, in eventi parziali di durata più breve di 1,2,3... e 11 ore di pari tempo di ritorno.

Noti quindi i valori orari di pioggia (in millimetri) si sono ipotizzati tre diversi scenari pluviometrici:

1. Evento ad intensità di pioggia sempre decrescente – “Pioggia 1”
2. Evento ad intensità di pioggia con fase crescente e poi decrescente – “Pioggia 2”
3. Evento ad intensità di pioggia sempre crescente – “Pioggia 3”

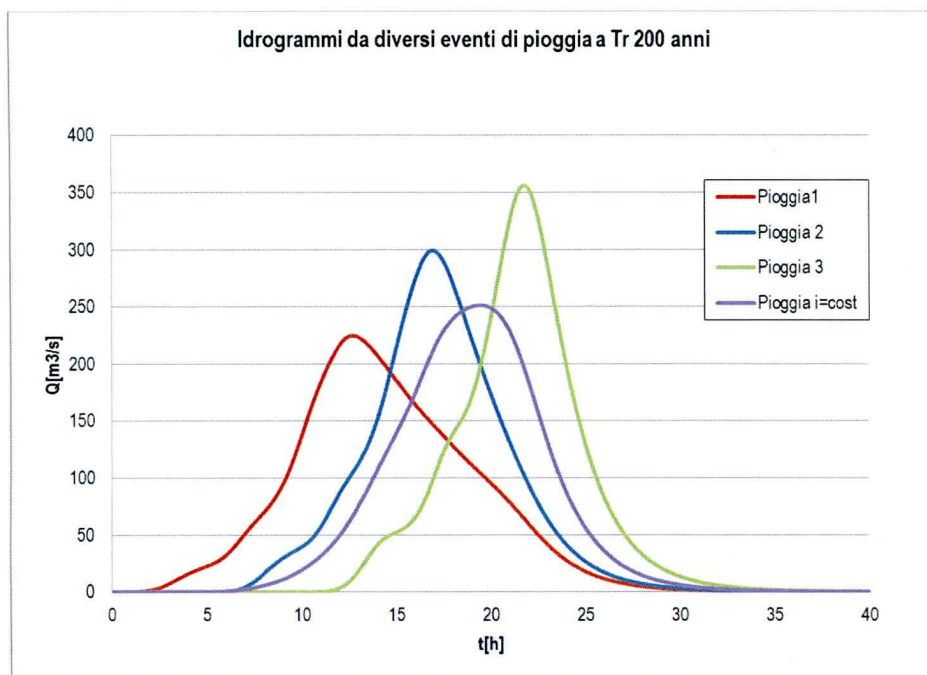
Durata	Pioggia 1	Pioggia 2	Pioggia 3
1	57.23	2.13	2.13
2	19.77	2.48	2.29
3	7.10	2.98	2.48
4	5.43	3.80	2.70
5	4.45	5.43	2.98
6	3.80	57.23	3.34
7	3.33	19.77	3.80
8	2.98	7.10	4.45
9	2.70	4.45	5.43
10	2.47	3.34	7.10
11	2.28	2.70	19.77
12	2.13	2.29	57.23



venti di pioggia di durata 12h, Tr 200 anni (Va.Pi. Puglia) ad intensità variabile

I tre eventi pluviometrici di durata 12 ore e tempo di ritorno di 200 anni (Va.Pi. Puglia) ad intensità variabile così costruiti, sono stati implementati nel modello idrologico Hec-Hms ottenuto dalla calibrazione sull'evento di Giugno 2014.

Nel grafico seguente sono presentati i valori degli idrogrammi risultanti alla sezione di chiusura del bacino della Lama Balice secondo i tre eventi pluviometrici ipotizzati, più quello ad intensità costante:



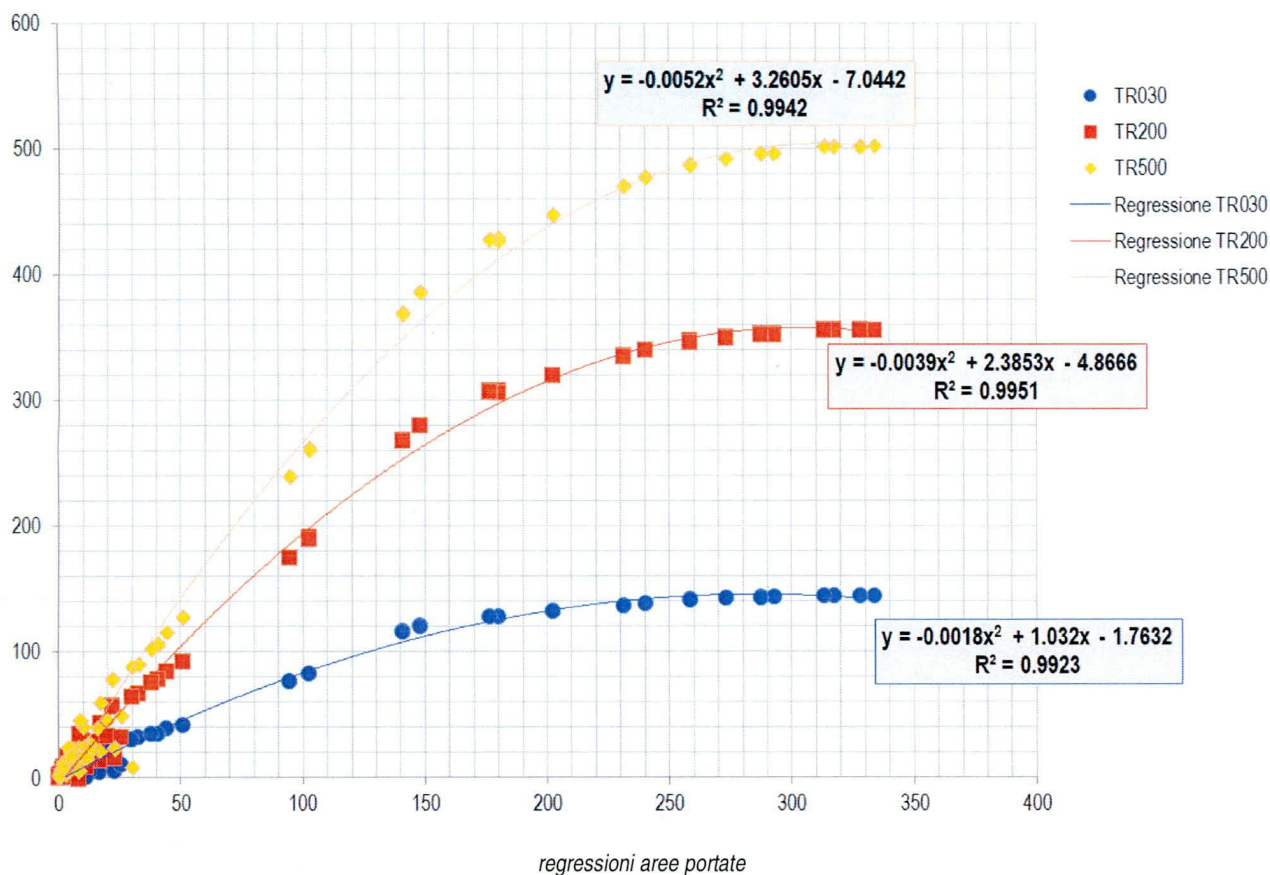
Idrogrammi risultanti da diverse distribuzioni pluviometriche di durata 12h e tempo di ritorno 200 anni Va.Pi. Puglia

Emerge che il valore al picco maggiore si ottiene nell'ipotesi n.3, evento ad intensità sempre crescente per tempo di ritorno di 200 anni, a cui corrisponde il picco più alto pari a 356,1 m³/s.

Per quanto esposto, pertanto, l'ipotesi di evento ad intensità sempre crescente e durata di 12 ore, è quello utilizzato nell'analisi idrologica per la definizione dei livelli di pericolosità idraulica generati dalle piene per tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni, dal reticolo principale della lama Balice.

Con tale approccio è stato possibile definire una regressione tra aree contribuenti dei sottobacini studiati, interni a quello principale della Lama Balice, e corrispondenti valori di portata al colmo; ciò al fine di definire una relazione semplice da utilizzare, all'interno del bacino della lama, al fine di una prima individuazione speditiva del valore di portata, assegnata la dimensione del bacino scolante.

Si riporta nel seguito un grafico con l'indicazione delle relazioni ottenute, in riferimento ai tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni previsti dalla norma vigente.



I risultati ottenuti dalle tre relazioni su indicate risultano avere, come evidente dal grafico sopra riportato, maggiore affidabilità per i bacini di dimensioni areali maggiori di 20/25 km².

Implementazione dei modelli idraulici

Come già anticipato nei paragrafi precedenti, nel caso in esame si è fatto riferimento, in funzione delle condizioni antropiche e morfologiche dei vari tratti di reticolo idrografico analizzato, a modelli di propagazione delle piene mono e bidimensionali.

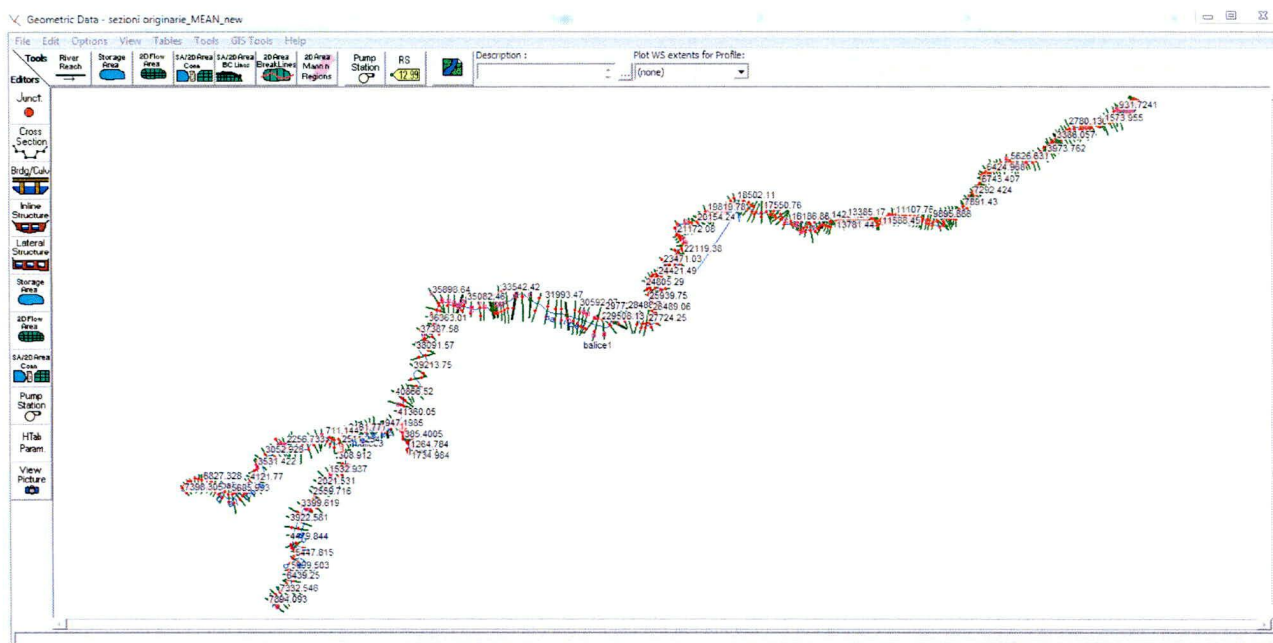
I modelli utilizzati sono in grado di gestire input idrologici diversi, forniti con diverse modalità. Nel caso studiato è univocamente determinabile, per ognuno degli input individuati in corrispondenza delle sezioni di ingresso dei reticoli oggetto di studio. Infatti per ogni sezione di ingresso sono stati inseriti gli idrogrammi di piena determinati, come descritto nei paragrafi precedenti, con il modello HEC-HMS, in modo da avere continuità con i perimetri a diversa pericolosità idraulica, già riportati nel PAI vigente. L'analisi è stata condotta impostando un valore di scabrezza di Manning variabile, con valori correlati alla mappa di uso del suolo in scala 1:5000 della Regione Puglia.

» Modello idraulico monodimensionale e bidimensionale

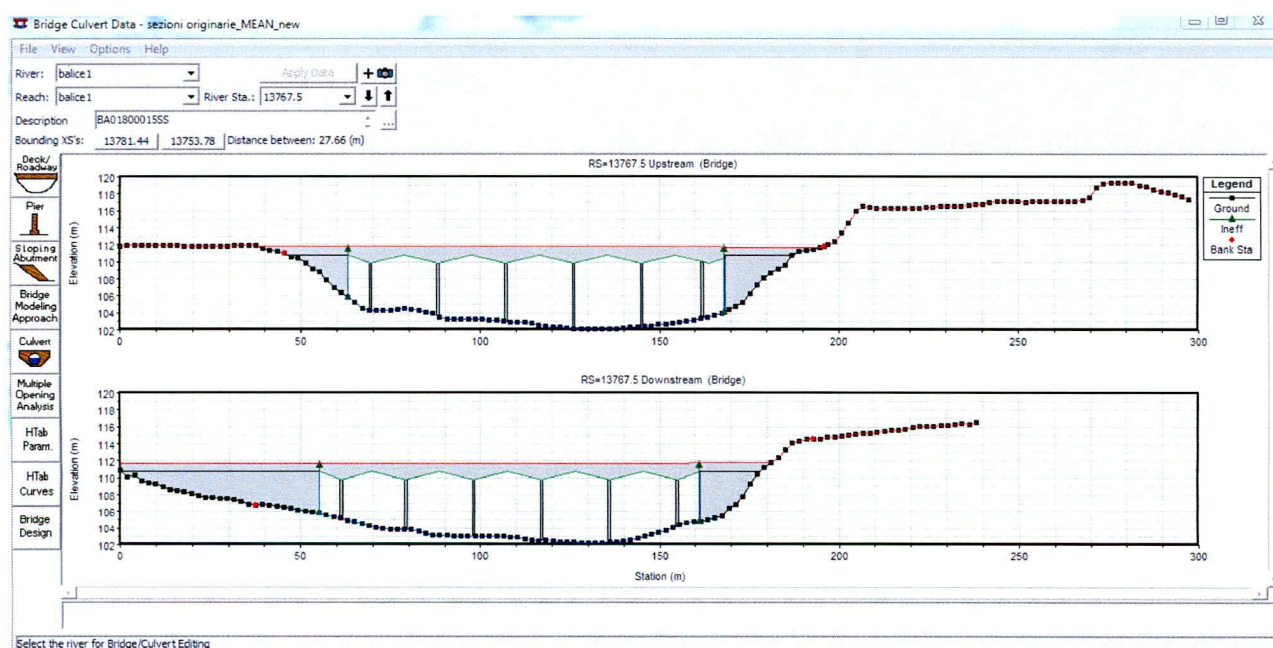
Come già anticipato nei paragrafi precedenti per simulare la propagazione della piena nei tratti di reticolo ove la direzione di propagazione è univocamente determinabile, si è fatto riferimento al software HEC-RAS

Il modello è stato implementato su base LiDAR per tutta l'estensione del reticolo principale, alcuni tratti, ove l'ipotesi di propagazione unidirezionale non è rispettata, sono stati implementati con SMS-TUFLOW.

A titolo di esempio si riportano nel seguito alcune immagini dei modelli impostati.

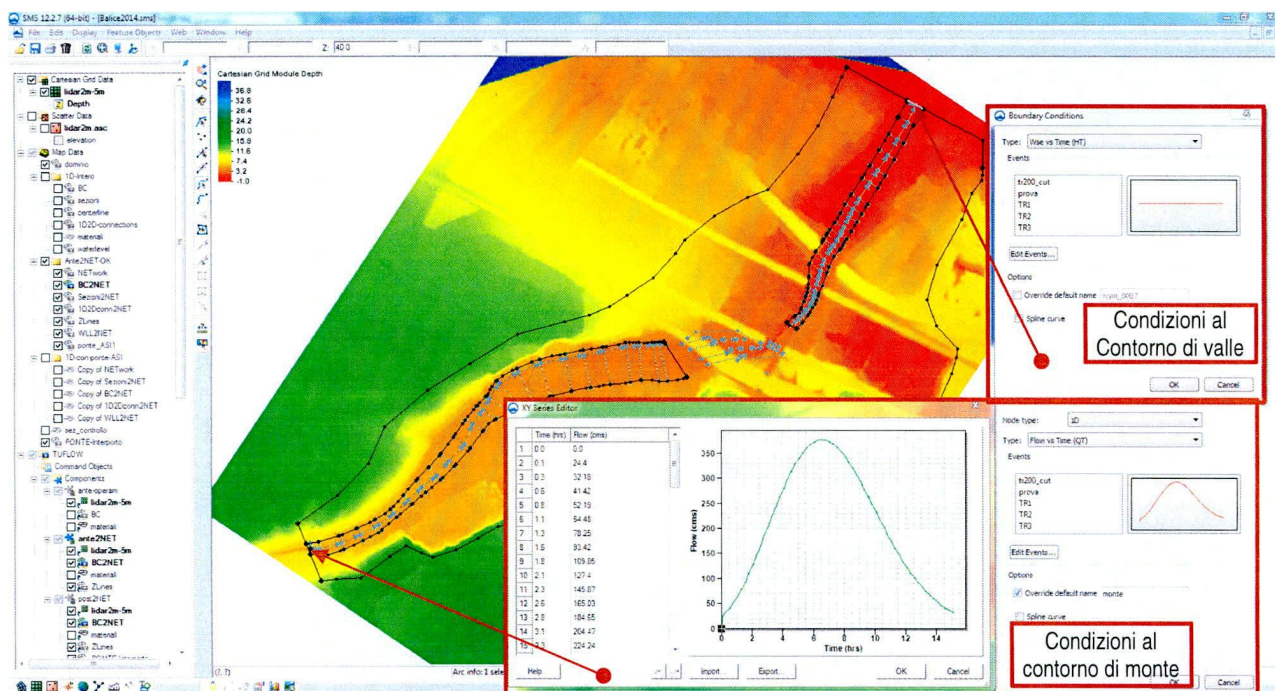


Modello di calcolo idraulico: rappresentazione della ricostruzione della geometria del sistema in HEC-RAS



esempio di ponte inserito in HEC-RAS





Modello di calcolo idraulico: rappresentazione delle sezioni di inserimento delle condizioni al contorno (monte e valle) nel tratto terminale della lama Balice

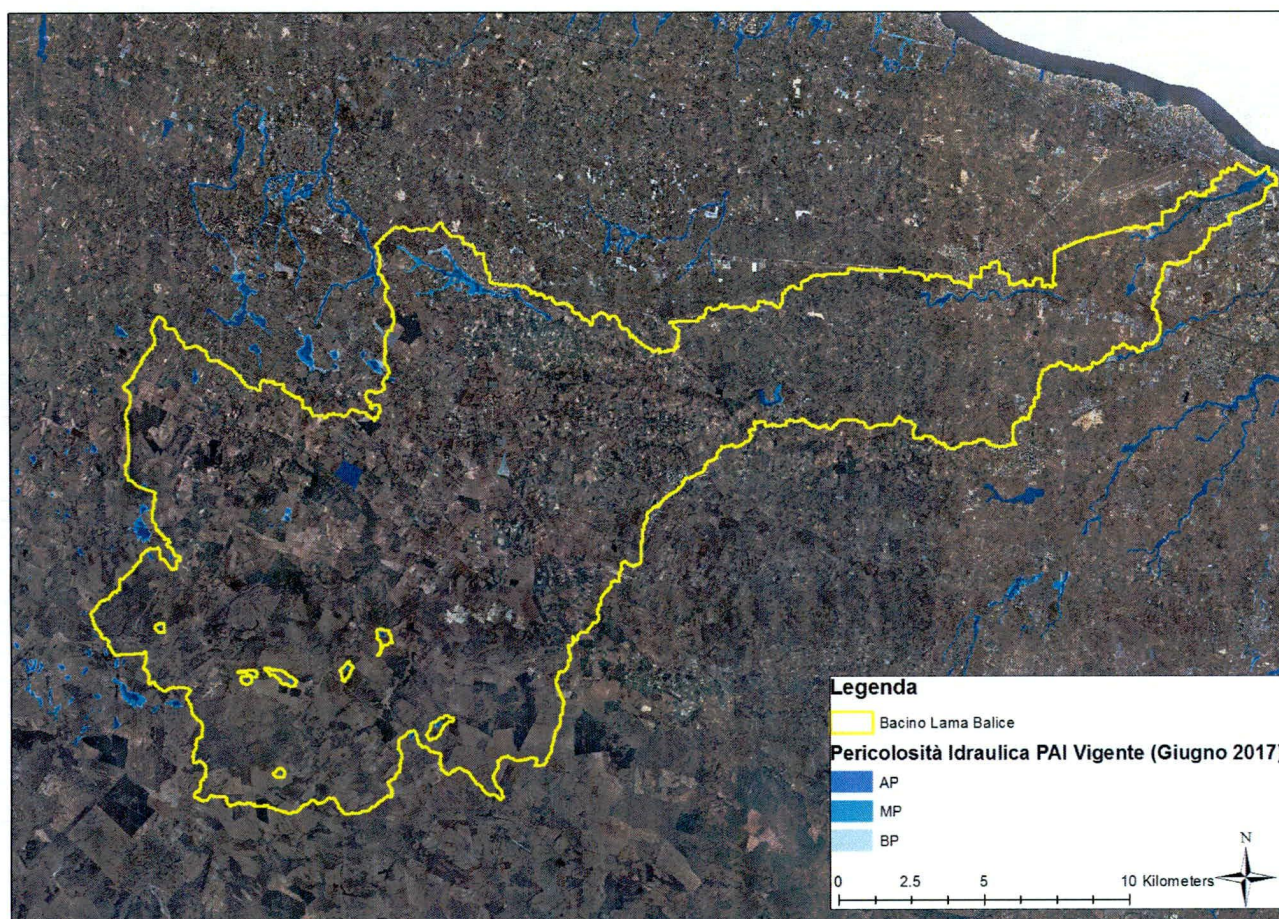
I modelli bidimensionali sono stati implementati, anch'essi su base LiDAR, definendo domini di calcolo a griglia quadrata, generalmente di lato pari a 5 metri. Il modello di foce della lama Balice, vista la complessità della geometria delle infrastrutture viarie che interseca, è stato realizzato come 1D-2D, con una matrice di calcolo a risoluzione di 2 metri. Le scelte delle risoluzioni dei modelli 2D sono state effettuate cercando il giusto compromesso fra l'elevato dettaglio del rilievo LIDAR e la capacità di elaborazione dei calcolatori disponibili nella gestione di un elevato quantitativo di dati. Le risoluzioni adoperate si ritengono ampiamente idonee a rappresentare i fenomeni simulati e a fornire output di dettaglio riferibile alla scala 1:5000.

Le analisi di modellazione idraulica sono state eseguite effettuando diverse ipotesi sulla geometria dei luoghi. Il motivo è dovuto sia alle trasformazioni morfologiche che si sono avute e probabilmente sono in corso, nella zona della maglia n.22, sia alla possibile futura realizzazione di opere di mitigazione della pericolosità idraulica che riguardano sia la lama Cutizza, in agro di Triggiano, sia la lama Sant'Anna, nel territorio comunale di Bari; opere su cui questa Autorità ha già espresso parere di compatibilità al PAI.

ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI E PROPOSTA DI MODIFICA AL PAI

Le valutazioni idrologiche ed idrauliche condotte secondo le metodologie sopra descritte hanno portato all'individuazione delle aree a diversa pericolosità idraulica nella porzione di territorio attraversata dal reticolo idrografico della lama Balice. I modelli utilizzati per la simulazione dei fenomeni di piena, hanno fornito come output i valori dei tiranti idraulici e delle velocità (oltre a numerosi altri parametri) per ogni step temporale di calcolo, per ognuna delle 5 geometrie studiate. Per i modelli 2D le due grandezze, tiranti e velocità, sono state opportunamente combinate secondo la relazione $U=d(t)*(0.5/1.3)*v(t) > 0.2$ i cui massimi temporali hanno definito le aree a pericolosità idraulica per i tre tempi di ritorno di riferimento: 30, 200 e 500 anni.

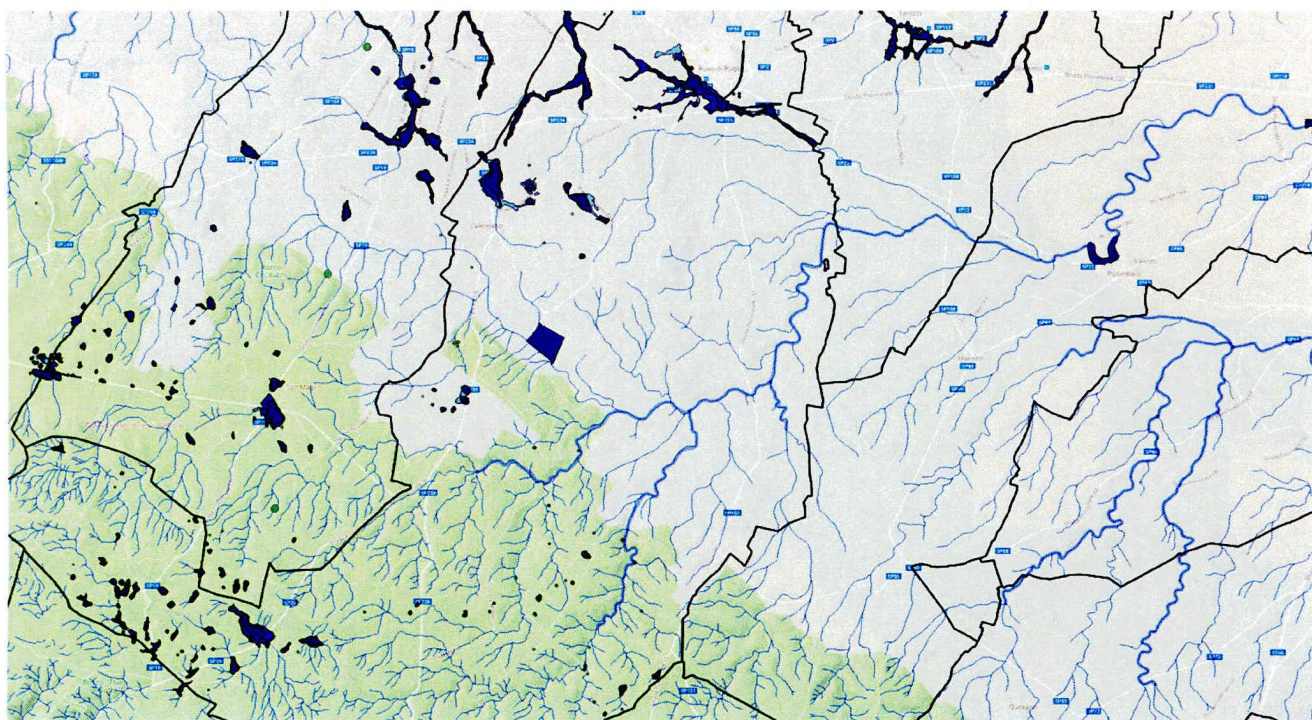
La configurazione delle pericolosità idrauliche all'attualità, si ritiene debba essere data dalla sovrapposizione degli output della configurazione n.1 e della configurazione n.2. Allo stato attuale il territorio studiato non presenta aree a pericolosità idraulica nel vigente PAI, gli studi condotti definiscono i reali livelli di pericolosità idraulica della zona definiti sulla base di rilievi di dettaglio, con l'ausilio di strumenti di calcolo all'avanguardia. Nel seguito si riporta la mappa delle aree ad Alta (blu), Media (azzurro) e Bassa (celeste) pericolosità idraulica della zona indagata, come proposta di integrazione al PAI.



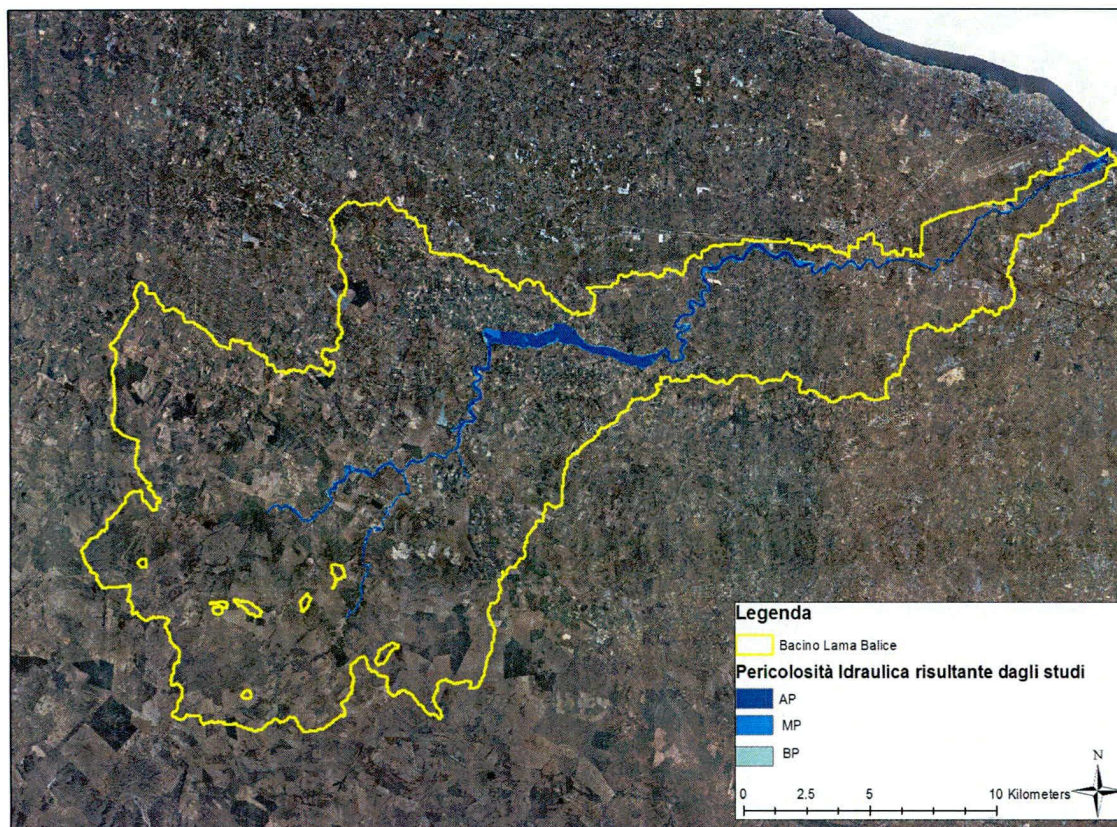
PAI vigente



Lama Balice: PAI vigente nei territori comunali di Bari, Bitonto e Modugno



Lama Balice: PAI vigente nella parte medio-alta del Bacino, territorio comunale di Ruvo di Puglia



Nuove aree a diversa pericolosità idraulica da inserire nel PAI

La nuova configurazione del PAI, che si propone di approvare, è raffigurata nella tavola allegata alla presente relazione.

Ing. Rocco Bonelli

Ing. Davide Prato