



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  
0014743  
E 09/11/2017 13:15:33

AL Dirigente  
Ing. Giuseppe Tedeschi  
SEDE

**OGGETTO** *Studio per la modifica ed aggiornamento delle aree a diversa pericolosità idraulica nel bacino idrografico della lama Lamasinata: territorio comunali Bitonto, Palo del Colle, Toritto, Grumo Appula, Binetto e Bitetto ex art. 24 delle NTA del PAI*

RELAZIONE ISTRUTTORIA

### PREMESSA

La presente istruttoria viene resa al fine di illustrare lo studio idrologico ed idraulico condotto dalla Segreteria Tecnica Operativa (STO), rivolto all'aggiornamento dell'assetto idraulico nel bacino idrografico della Lama Lamasinata nei territori comunali di Bitonto, Palo del Colle, Toritto, Grumo Appula, Binetto e Bitetto ai sensi dell'art. 24 delle NTA del vigente PAI. Esso è funzionale anche alle attività di aggiornamento delle mappe di pericolosità e rischio da alluvioni del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (D.Lgs. n. 49/2010, Direttiva 2007/60/CE). Le suddette attività rientrano tra quelle previste dalle "Attività conoscitive per la migliore definizione dei modelli idrologici applicabili in ambiente carsico e dei conseguenti monitoraggi possibili in presenza del necessario coordinamento tra il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (Direttiva 2007/60/CE – D. Lgs. n. 49/2010) e il Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (PAI) dell'Autorità di Bacino della Puglia", in applicazione della convenzione tra Regione Puglia e Autorità di Bacino della Puglia stipulata in data 15.04.2016 nell'ambito del P.O.R. PUGLIA 2014 – 2020, Asse V, Azione 5.1..



## 1 Inquadramento dell'area in esame

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 Lamasinata (Figura 1.1).

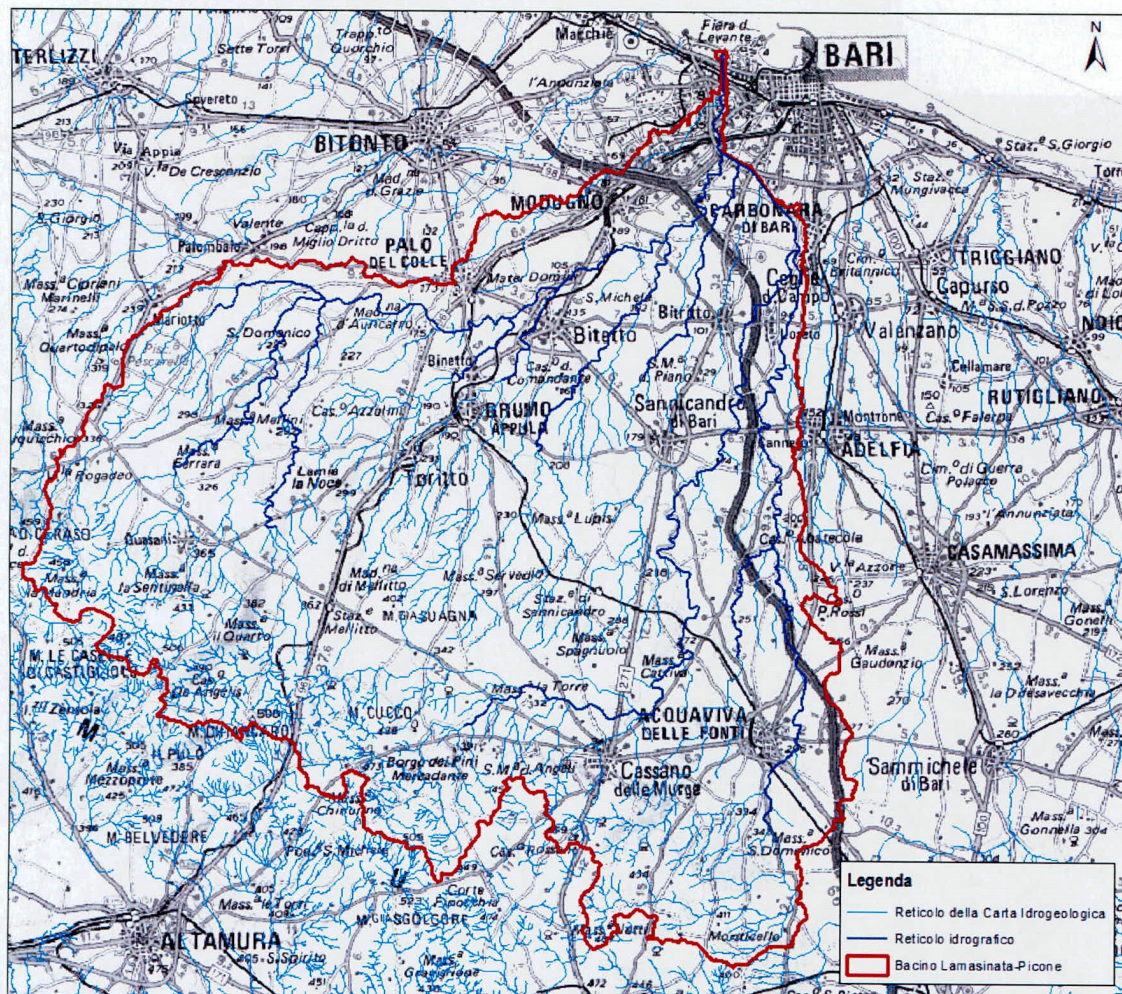


Figura 1.1 – Bacino idrografico della Lama Lamasinata su I.G.M. 1:250.000

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

Allo stato attuale, l'asta fluviale della Lama Lamasinata è a tratti vincolata dal vigente Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (PAI) (Figura 1.2), per cui sono stati condotti approfondimenti sui tratti privi di studi idraulici, estendendo l'analisi anche alcuni reticoli minori (che sottendono bacini con aree contribuenti inferiori ai 25 km<sup>2</sup>) in modo da garantire una continuità idraulica con le aree già assoggettate al PAI vigente.



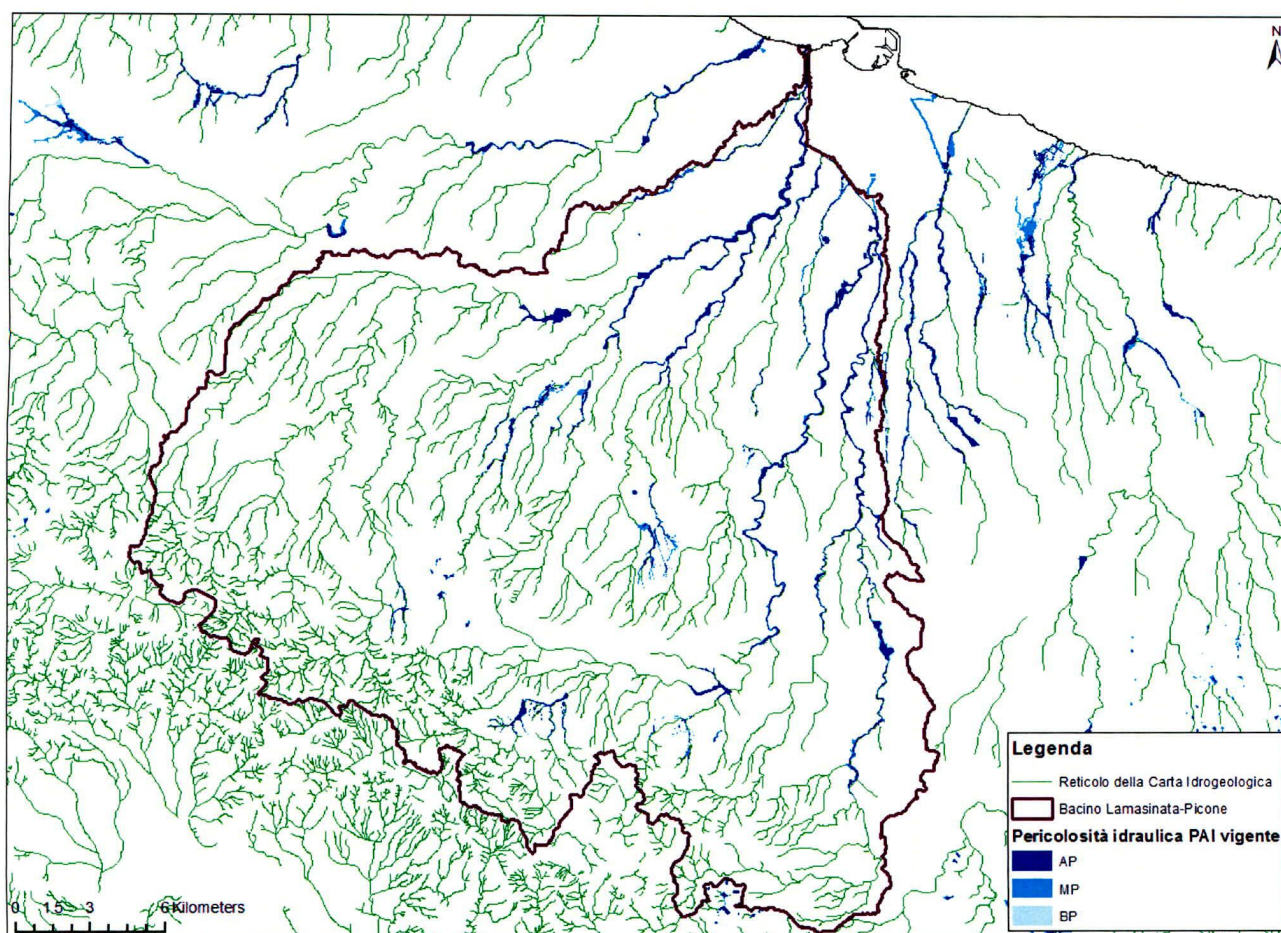


Figura 1.2 – Inquadramento delle aree a diversa pericolosità idraulica riportate nel vigente PAI in corrispondenza del bacino idrografico della Lama Lamasinata

L'area oggetto del presente studio è chiusa a monte della confluenza dell'asta principale della Lama Lamasinata con il Canale Deviatore che convoglia le acque alluvionali provenienti dal Torrente Picone nel tratto di foce sistemato della stessa lama Lamasinata. Il presente studio non si sovrappone a quelli condotti per i tratti già analizzati nel dettaglio in precedenza (Figura 1.3); si configura quindi quale completamento ed estendimento degli studi già condotti a quei tratti di reticolo non precedentemente esaminati.



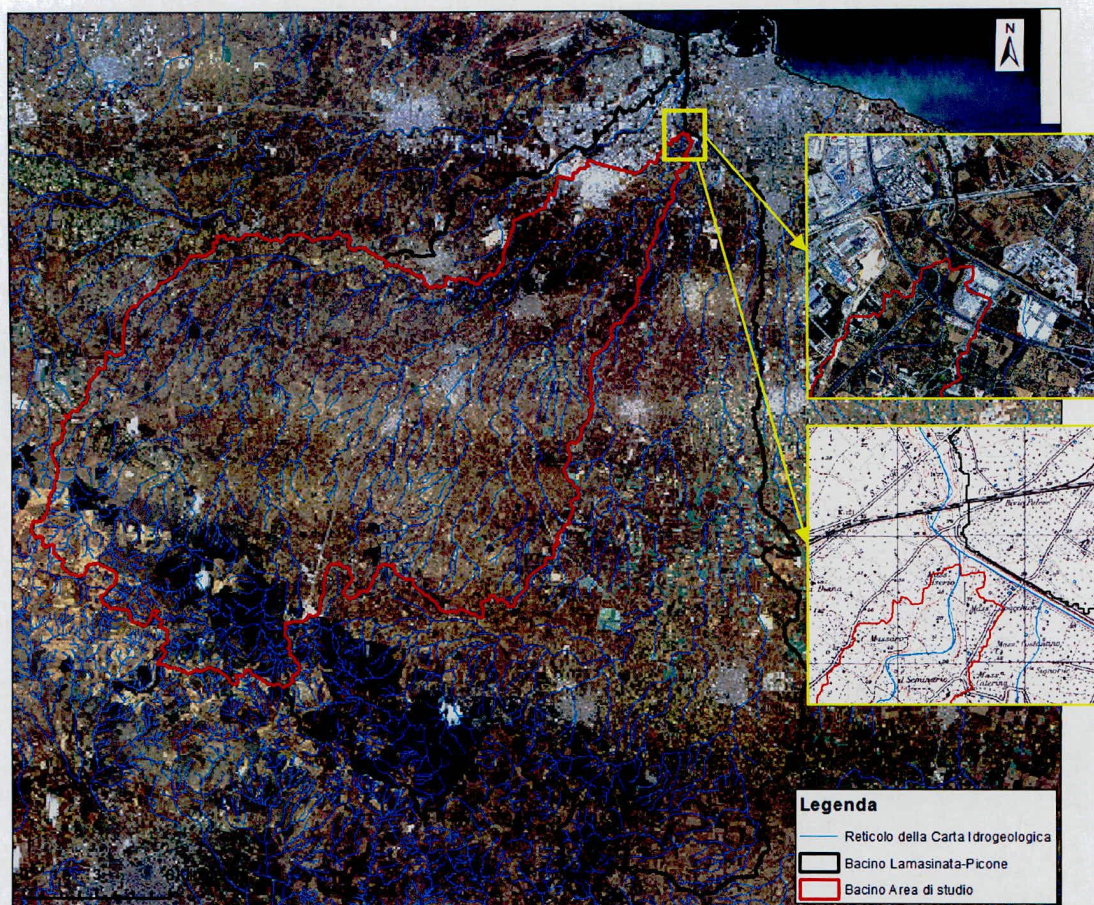


Figura 1.3 – Bacino dell'area di studio su ortofoto

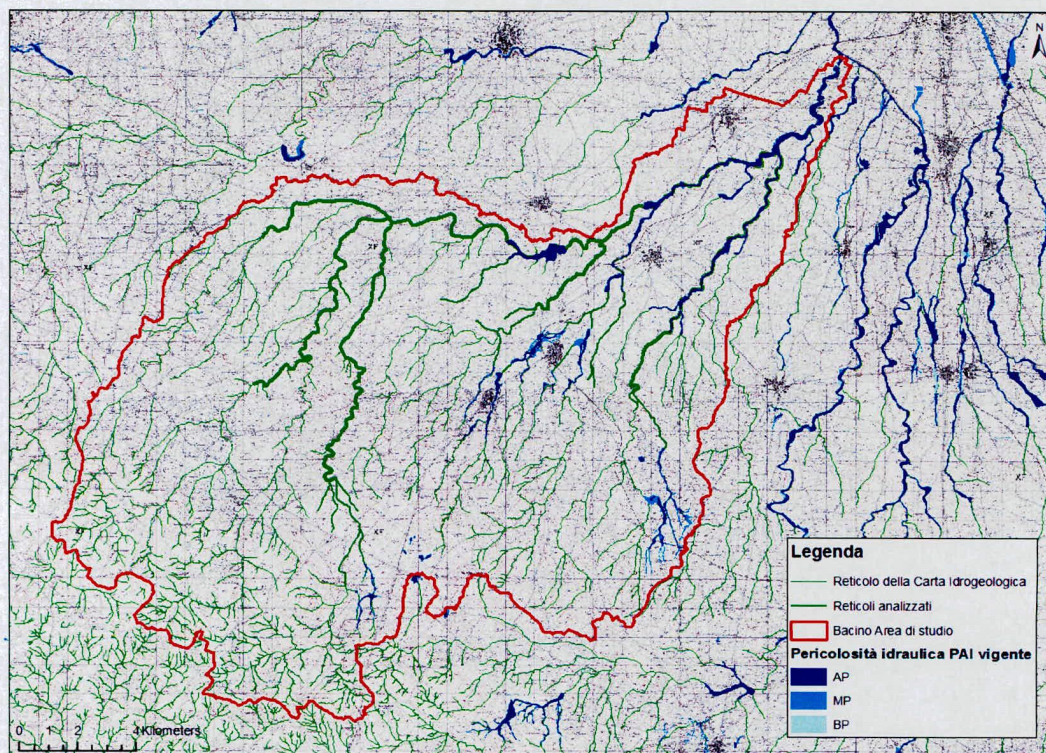


Figura 1.4 – Inquadramento delle aree a diversa pericolosità idraulica riportate nel vigente PAI in corrispondenza dell'area di studio su cartografia IGM 1:25.000



L'area interessa, quindi, la porzione di territorio del bacino idrografico di Lama Lamasinata che attraversa i confini comunali di Bitonto, Palo del Colle, Toritto, Grumo Appula, Binetto e Bitetto (Figura 1.5).

La lama in esame è caratterizzata da ramificazioni di diversa lunghezza e larghezza costituiti da terreni sabbiosi e terrosi, a fondo in prevalenza piatto e con alternanza di sponde piuttosto lievi e ben evidenti che si estendono dalla Murgia nord-occidentale fino a sfociare nell'Adriatico. Nello specifico, l'area nell'agro di Palo del Colle è caratterizzata da sezioni larghe dai 50 m ai 100 m (talvolta 150 m) e presenta una morfologia con dislivelli mediamente inferiori ai 3 m. Verso valle, invece, al confine tra i territori di Bitetto e Modugno, si allarga fino a raggiungere dimensioni di circa 200 m. Il territorio in oggetto è prevalentemente occupato da uliveti e nelle zone contermini la lama è possibile trovare aree a pascolo, seminativi, suoli rimaneggiati ed anche aree antropizzate a vario grado.

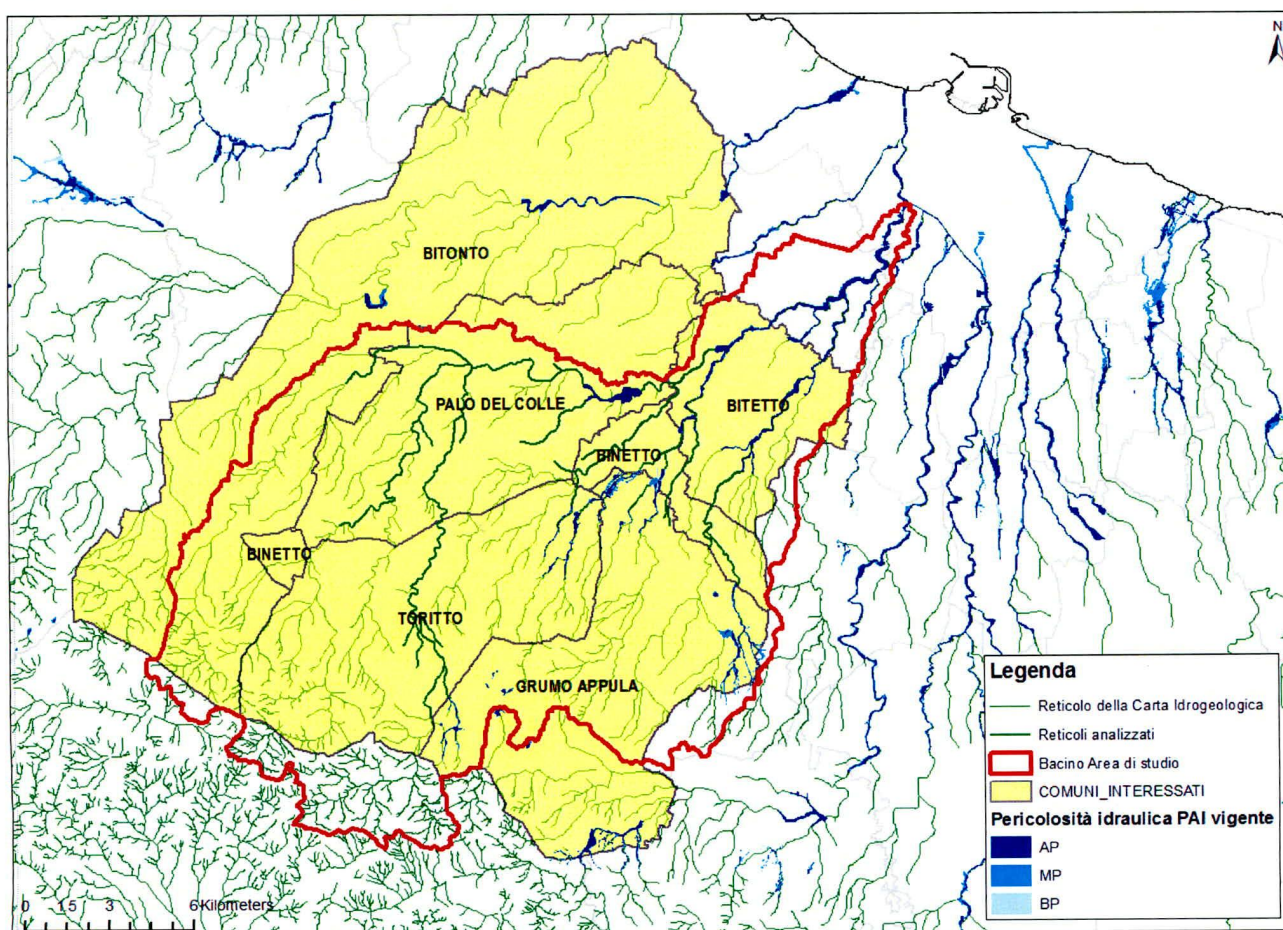


Figura 1.5 – Territori comunali maggiormente interessati dal bacino dell'area di studio

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.

La simulazione della propagazione delle piene di riferimento lungo l'asta principale della Lama Lamasinata è stata condotta partendo dai modelli monodimensionali sviluppati da questa Autorità nell'ambito dello "Studio di Fattibilità per la definizione delle opere necessarie alla messa in sicurezza del reticolo idraulico interessate dagli eventi alluvionali



di Ottobre e Novembre 2005 nelle province di Bari e Brindisi” (Codice ADB12) inserito nell'Accordo di Programma Quadro in materia di “Difesa del Suolo”, finanziato con le risorse trasferite dallo Stato con fondi CIPE n. 35/2005, opportunamente verificati, adeguati ed integrati da analisi di propagazione in domini 2D per quelle porzioni di bacino idrografico ove lo schema monodimensionale non rappresenta adeguatamente lo stato dei luoghi.

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.



## 2 Quadro conoscitivo a disposizione

Si riportano nel seguito i dati che hanno consentito di ampliare ulteriormente il quadro conoscitivo ed elaborare gli studi di maggior dettaglio, oggetto della presente relazione tecnica:

- Cartografia IGM in scala 1:25000 formato raster;
- Cartografia CasMez 1:5000 formato raster;
- Foto aeree a colori;
- Carta Idrogeologica della Regione Puglia;
- Dati altimetrici della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5000;
- Modello digitale del terreno (DEM) della Regione Puglia con risoluzione 8x8 m;
- Rilievo LIDAR fornito dal MATTM;
- Carta dell'uso del suolo della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5000;
- Rilievi degli attraversamenti idraulici relativi delle infrastrutture viarie e a rete in senso generale;
- Sopralluoghi condotti dai funzionari della STO per la verifica dello stato dei luoghi;
- Relazione Generale "Studio di Fattibilità per la definizione delle opere necessarie alla messa in sicurezza del reticolo idraulico interessate dagli eventi alluvionali di Ottobre e Novembre 2005 nelle province di Bari e Brindisi" CIPE n. 35/2005.

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.



### 3 Analisi Morfologica-Morfometrica 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 Lamasinata 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 l'asta principale del reticolo idrografico della Lama Lamasinata, definendo le condizioni di pericolosità idraulica per tutto il suo percorso. Per poter portare a termini l'analisi si è dovuto suddividere il bacino idrografico complessivo in sottobacini isocaratteristici, introducendo sezioni di chiusura in corrispondenza delle maggiori intersezioni e alle confluenze del reticolo idrografico. 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: è 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;



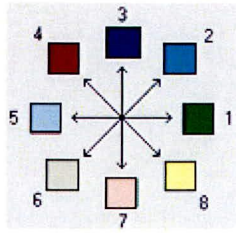


Figura 3.1 – Direzioni di deflusso (flow direction)

- **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 idrologica:

- *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;

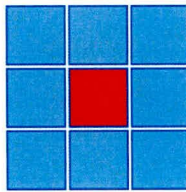


Figura 3.2 - Schematizzazione del metodo di HORN per il calcolo della pendenza in GIS

- *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 lenght)*;

- *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;



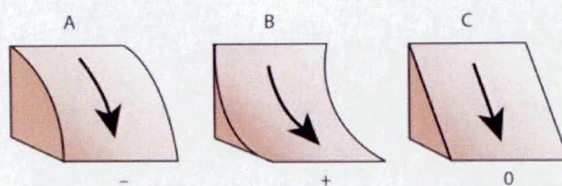


Figura 3.3 - Curvatura del profilo (longitudinale)

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.

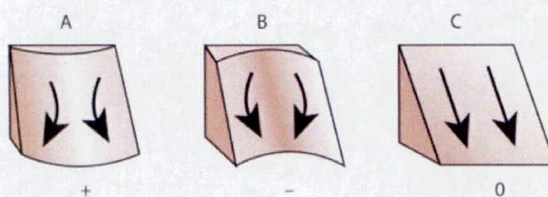


Figura 3.4 - Curvatura tangenziale

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.

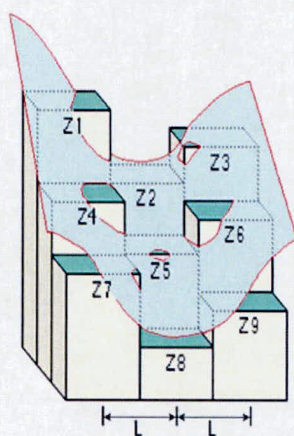


Figura 3.5 - Generazione delle curvature per celle contigue

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 il bacino idrografico della Lama Lamasinata sotteso alla confluenza dell'asta principale con il Canale Deviatore del Torrente Picone nel Torrente S. Francesco (Figura 3.6).



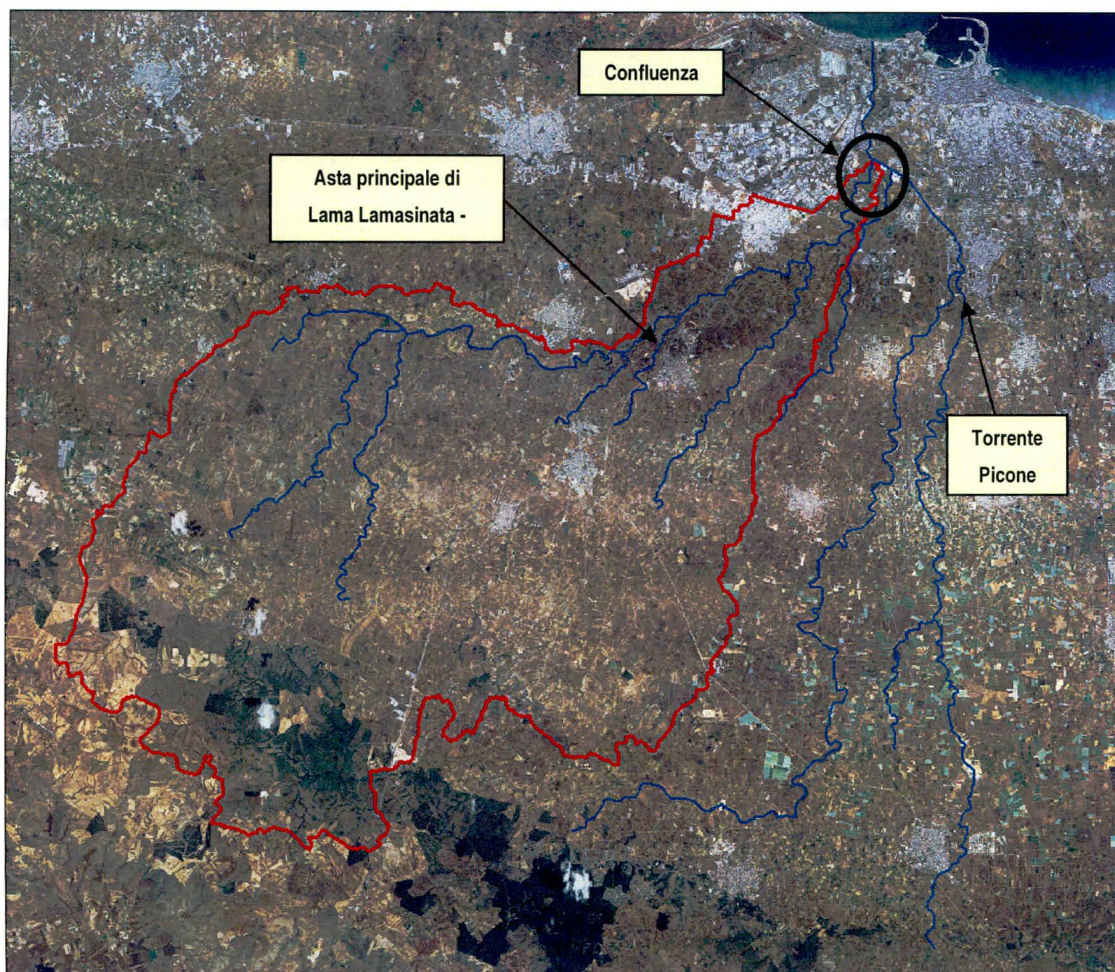


Figura 3.6 – Bacino di studio (in rosso) chiuso alla confluenza con il Torrente Picone

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 analizzato. 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, pendenza media, 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.



L'elaborazione in GEO-HMS ha consentito, sulla base del database topografico e cartografico di dettaglio in precedenza descritto, lo sviluppo planimetrico dei sottobacini idrografici (Figura 3.7), con le caratteristiche morfometriche implementabili in HEC-HMS (Tabella 3.1, Tabella 3.2), e l'intero schema idrologico di calcolo (Figura 3.8).

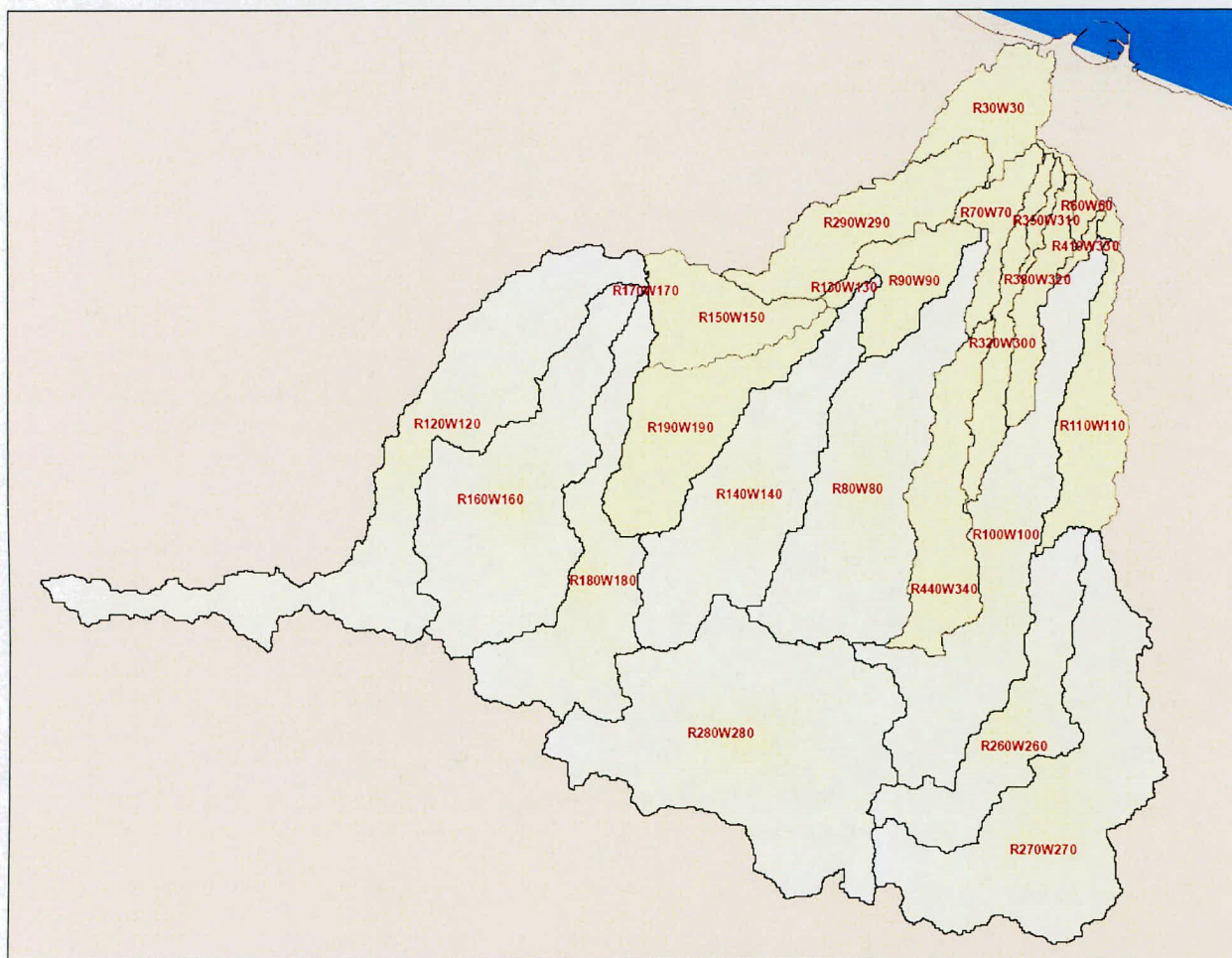


Figura 3.7 – Sottobacini idrologici facenti parte delle lame Picone e Lamasinata

CARATTERISTICHE FISIOGRAFICHE DEL BACINO DI STUDIO CHIUSO ALLA CONFLUENZA CON IL TORRENTE PICONE					
Area contribuente [km <sup>2</sup> ]	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]
325.30	4.173	22.84	513.46	268.97	59.104

Tabella 3.1 - Caratteristiche morfometriche del bacino complessivo dell'area di studio



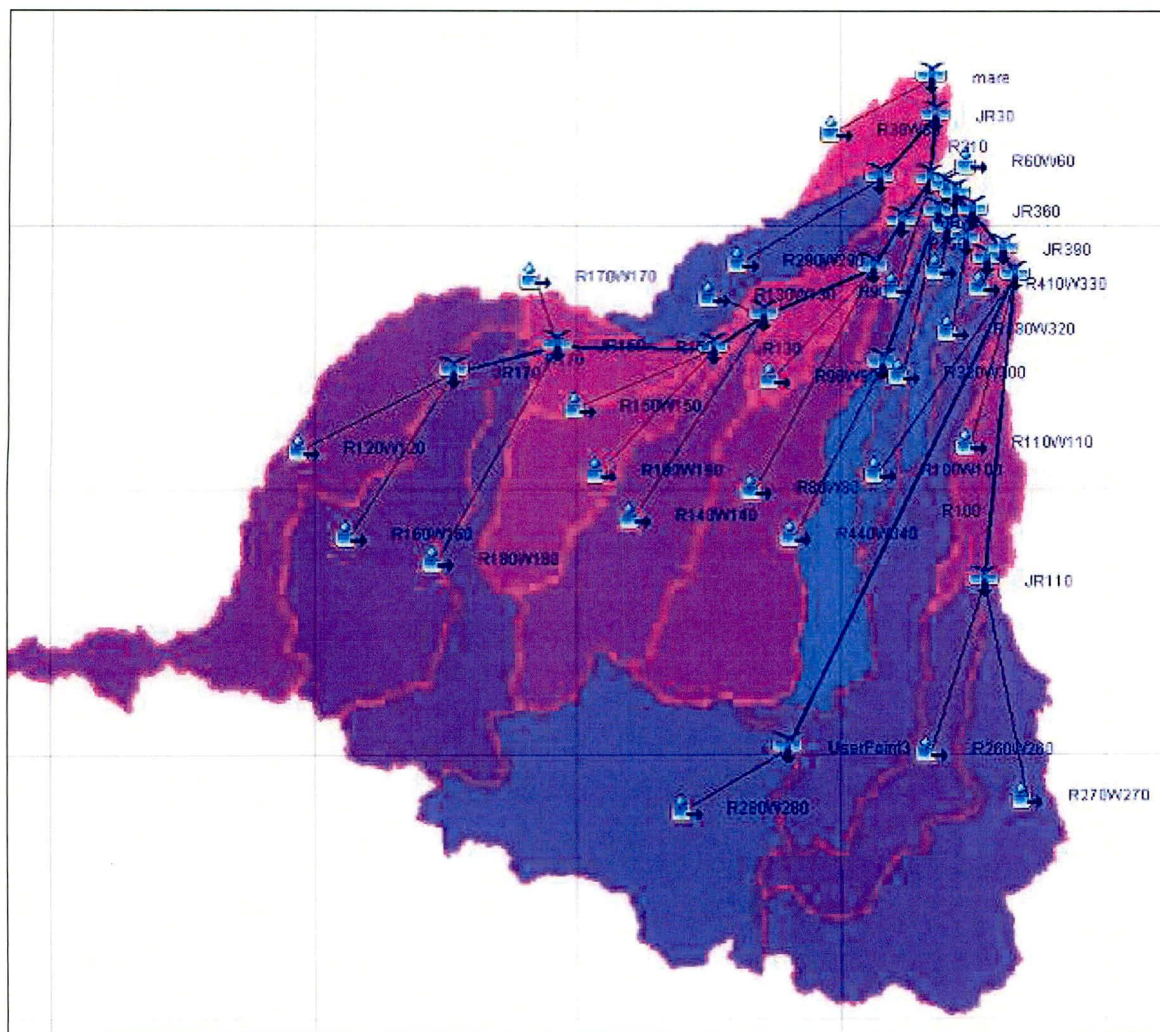


Figura 3.8 – Schema idrologico di calcolo per le lame Picone e Lamasinata

Bacino	River	Area contribuyente [km <sup>2</sup> ]	Pendenza media del bacino [%]	Basin Lag [ore]	Quota max [m]	Quota med [m]	Quota min [m]
R160W160	Lamasinata 11	60.38	3.84	8.90	509.00	353.48	181.00
R120W120	Lamasinata 10	71.70	2.66	14.41	656.00	374.19	182.00
R180W180	Lamasinata 8	40.73	3.65	10.8	511.00	378.31	181.00
R170W170	Lamasinata 9	0.02	0.44	0.27	182.00	181.50	181.00
R150W150	Lamasinata 7	19.52	2.51	4.17	229.00	180.68	118.00
R130W130	Lamasinata 5	1.70	3.27	1.11	138.00	117.60	100.00
R190W190	Lamasinata 6	30.17	2.77	7.05	367.00	247.70	119.00
R140W140	Lamasinata 4	50.04	3.02	7.39	405.00	269.87	101.00
R90W90	Lamasinata 3	14.20	2.11	3.71	155.00	105.92	53.00
R80W80	Lamasinata 2	58.69	2.23	9.49	378.00	223.09	66.00

Tabella 3.2 - Caratteristiche morfometriche dei sottobacini dell'area di studio



## 4 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 (GNDCI). 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.

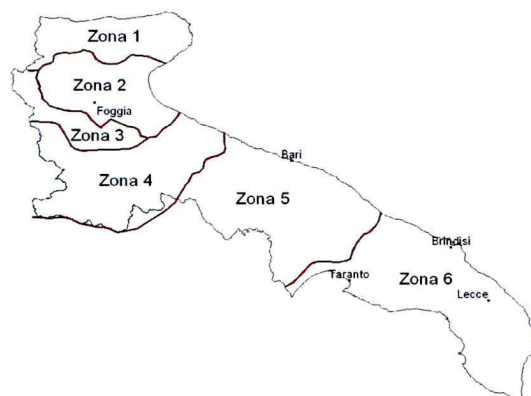


Figura 4.1 – Va.Pi. zone omogenee per la Puglia

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:

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

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 prefinito tempo di ritorno esso va moltiplicato per un fattore di crescita, che è definito dalla seguente relazione:

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



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  $K_T$  risulta:

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

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 Lamasinata.

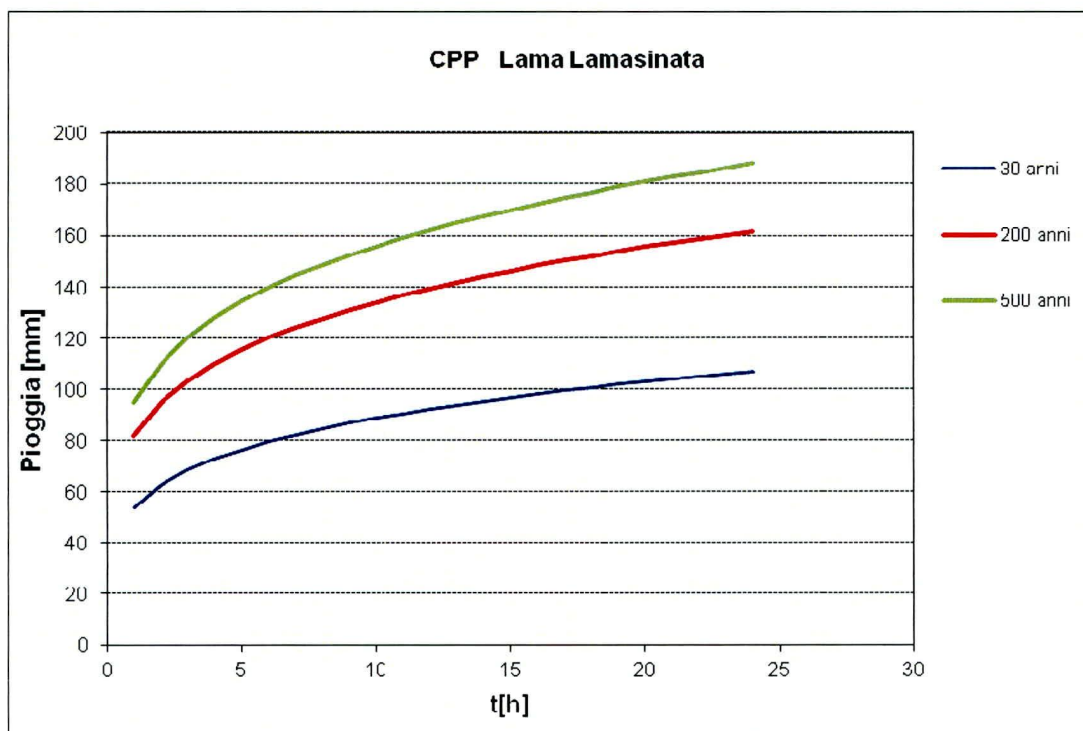


Figura 4.2 – CPP Lama Lamasinata Va.Pi. - Zona 5

### 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 si 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.



<b>Gruppo A</b>	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.
<b>Gruppo B</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.
<b>Gruppo C</b>	Suoli aventi potenzialità di deflusso moderatamente alta. Suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali. Scarsa capacità di infiltrazione e saturazione.
<b>Gruppo D</b>	Potenzialità di deflusso molto elevata. Argille con elevata capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressochè impermeabili in vicinanza della superficie. Scarsissima capacità di infiltrazione a saturazione.

Tabella 4.1 - 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.

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

Tabella 4.2 - Gruppi geolitologici

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.

*Modello idrologico generale per le lame di Bari - Applicazione del modello HMS per il calcolo dell'idrogramma di piena e delle portate al picco*

Il calcolo della precipitazione efficace e del ruscellamento superficiale è stato effettuato attraverso il software HEC HMS (Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modeling System), utilizzando il metodo del CN-SCS (Curve Number del Soil Conservation Service). La metodologia utilizzata, particolarmente adatta alla realtà territoriale in esame, consente la ricostruzione delle piene attraverso la definizione dell'indice CN (Curve Number), valore che dipende dalla geologia e dall'uso del suolo. Come già descritto in precedenza, il CN rappresenta l'attitudine del bacino esaminato a produrre deflusso e si determina in base alle caratteristiche idrologiche dei suoli, della copertura vegetale e dal grado di antropizzazione dei luoghi; il metodo tiene anche conto delle condizioni di umidità del suolo antecedenti all'inizio dell'evento. In particolare, attraverso l'analisi della carta geologica, dell'ortofoto, della carta dell'uso del suolo, si è provveduto a valutare il valore del Curve Number ponderato per ciascun sottobacino.

Infine, per le valutazioni sul trasferimento dell'onda di piena attraverso il reticolo idrografico, la modellazione si è basata sul metodo del LAG che consente di tener conto e valutare in via sintetica il ritardo dell'idrogramma di piena.

*Schema del modello e procedura di calcolo*

Lo schema del modello idrologico implementato è stato determinato sul GIS con l'ausilio dell'estensione GEO-HMS. Si è proceduto alla determinazione dei sottobacini principali delle lame esaminate secondo la schematizzazione più congruente all'obiettivo prefissato. Lo studio ha riguardato la lama Picone e la lama Lamasinata, considerando il contributo dell'intero bacino suddiviso in sottobacini isocaratteristici, per ognuno dei quali si sono calcolate le caratteristiche e i parametri fondamentali utilizzati nel calcolo in HMS. L'elaborazione in GEO-HMS ha consentito di avere lo schema concettuale di bacino, con le caratteristiche di ogni sottobacino già implementabili in HEC-HMS.



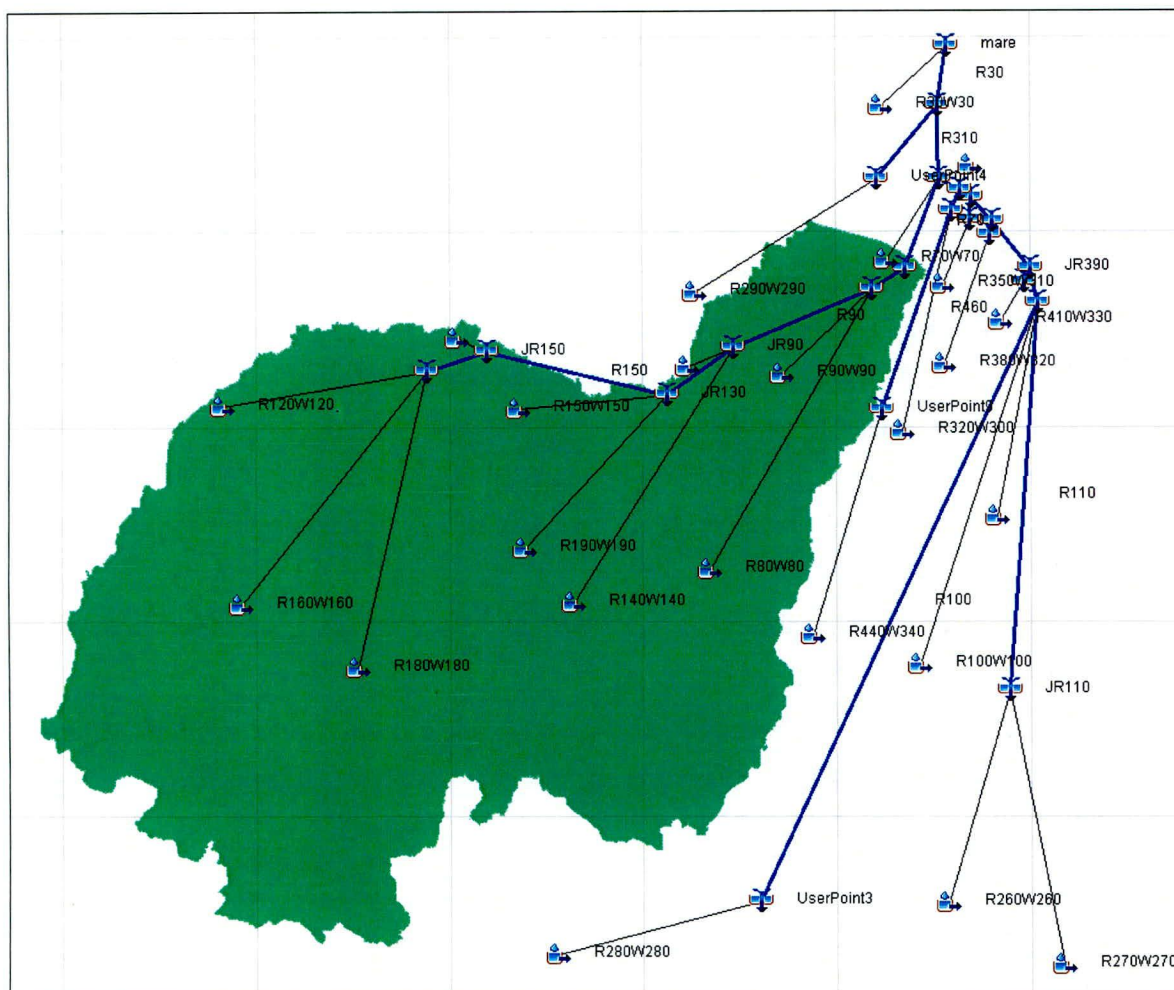


Figura 4.3 – Schema idrologico di calcolo per il reticolo idrografico di Lama Lamasinata e del bacino idrografico dell'area di studio (in verde)

### Elaborazioni

Importato lo schema concettuale del modello in HMS si è proceduto all'implementazione dei dati di pioggia (time series data). Dalla CPP si sono ricavati gli ietogrammi di pioggia per durate critiche di 1, 3, 6, 12, 18, 24 ore e per tempi di ritorno di 30, 200, 500 anni.

In prima analisi, per ogni durata di pioggia, si è adoperato uno ietogramma costante; in seconda analisi, per ottenere una situazione più aderente alla realtà, si è fatto riferimento all'Alternating Block Method che consente di ottenere risultati molto prossimi a quelli ottenibili applicando uno ietogramma Chicago ma con una notevole riduzione del picco che può generare valori di portate eccessivamente cautelativi.

Nell'HMS è possibile inserire più tipi di ietogrammi per diverse durate di pioggia ed è possibile associare ad ogni sottobacino uno ietogramma diverso in funzione della durata di pioggia critica.

Tale approccio ha consentito di determinare tanti modelli per ogni ietogramma disponibile; inoltre si è creato un successivo Meteorologic Model considerando gli ietogrammi riferiti alla pioggia critica (Time Lag Mokus / 0,6) per ogni sottobacino. Pertanto allo schema concettuale dei bacini si è associato un sistema di ietogrammi con pioggia critica e forma variabile associabili indipendentemente ad ognuno dei sottobacini.



Lo istogramma a cui si è fatto riferimento nell'analisi è stato quello ottenuto con l'applicazione dell'Alternating Block Method che ha fornito valori e forma degli idrogrammi di piena molto aderenti a quelli ricostruiti per il bacino del Picone in occorrenza dell'evento dell'ottobre 2005.

Un parametro fondamentale per ottenere un risultato il più possibile aderente alla situazione reale è il modello di implementazione della funzione di trasferimento dell'onda di piena precedentemente citato. A causa dell'irregolarità delle sezioni, eccetto nei deviatori, è stato possibile considerare solamente un effetto di propagazione temporale trascurando quelli di laminazione che comunque, tendono ad appiattire l'idrogramma abbassando il valore della portata al picco e allungando l'onda di piena; pertanto si è considerato cautelativamente il solo sfasamento temporale delle onde di piena (metodo LAG). Il tempo di propagazione dell'onda di piena, per ciascun tratto, è stato calcolato come rapporto della lunghezza del tratto di canale interessato e una velocità media che si è fissata pari a 1,5 m/sec.

Impostato il modello idrologico in tutte le sue parti e considerando l'approccio SCS-CN come metodo di separazione delle piogge, si è proceduto alle simulazioni. I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli già in possesso e con quelli determinati con l'approccio razionale sui bacini complessivi.

Questi ultimi si sono dimostrati non eccessivamente distanti dalla valutazione effettuata con la metodologia SCS-CN descritta in precedenza e molto simili ai valori applicati in precedenti studi sulla zona.

Nella tabella seguente sono riportati i valori di portata utilizzati per l'input delle simulazioni idrauliche relative alle situazioni studiate.

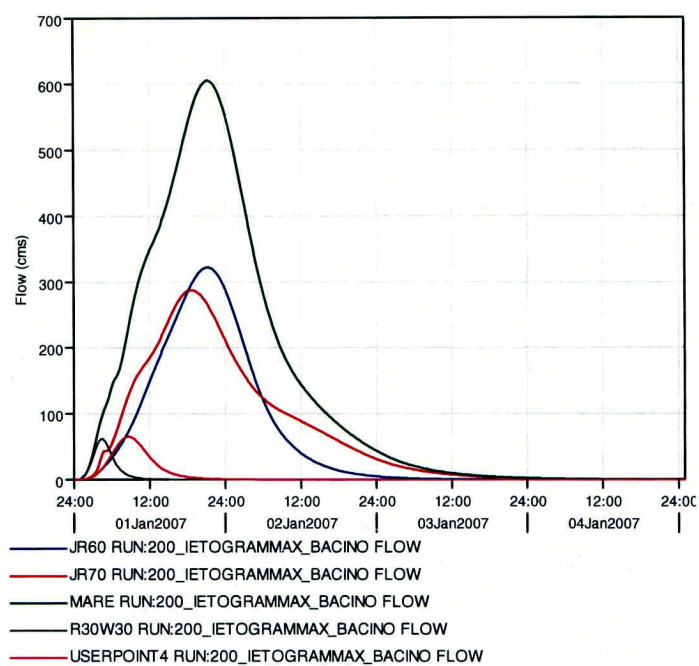
Bacino	Portata [m <sup>3</sup> /s]		
	T <sub>R</sub> = 30 anni	T <sub>R</sub> = 200 anni	T <sub>R</sub> = 500 anni
Lamasinata	420	600	809

Bacino	River	Q (Tr 30) [m <sup>3</sup> /s]	Q (Tr 200) [m <sup>3</sup> /s]	Q (Tr 500) [m <sup>3</sup> /s]
R160W160	Lamasinata 11	48.4	87.40	108.10
R120W120	Lamasinata 10	43.30	77.60	95.70
R180W180	Lamasinata 8	26.40	47.90	59.40
R170W170	Lamasinata 9	91.70	165.00	203.80
R150W150	Lamasinata 7	84.80	153.30	189.70
R130W130	Lamasinata 5	100.20	180.30	222.80
R190W190	Lamasinata 6	32.50	58.10	71.50
R140W140	Lamasinata 4	53.20	94.90	106.70
R90W90	Lamasinata 3	142.80	255.60	256.60
R80W80	Lamasinata 2	42.10	81.30	102.10

Tabella 4.3 - Schema valori di portata al picco determinati con l'ausilio del modello idrologico nelle sezioni più significative

Il grafico di seguito riportato è rappresentativo degli idrogrammi di piena in alcune delle sezioni più rappresentative per eventi riferiti ad un tempo di ritorno di 200 anni.



*Figura 4.4 – Lamasinata foce*



## 5 Analisi Idraulica

Il reticolo idrografico della Lama Lamasinata, così come il resto del reticolo carsico murgiano, è caratterizzato 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. Quanto detto impone l'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 Lamasinata 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.

### 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](http://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 è possibile inoltre 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.

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

dove

$Y_1$  e  $Y_2$  = tirante idraulico nelle sezioni corrispondenti

$Z_1$  e  $Z_2$  = quota di fondo alveo nella sezione corrispondente

$\alpha_1$  e  $\alpha_2$  = coefficiente di velocità nella sezione corrispondente

$g$  = accelerazione gravitazionale

$h_e$  = perdite di energia

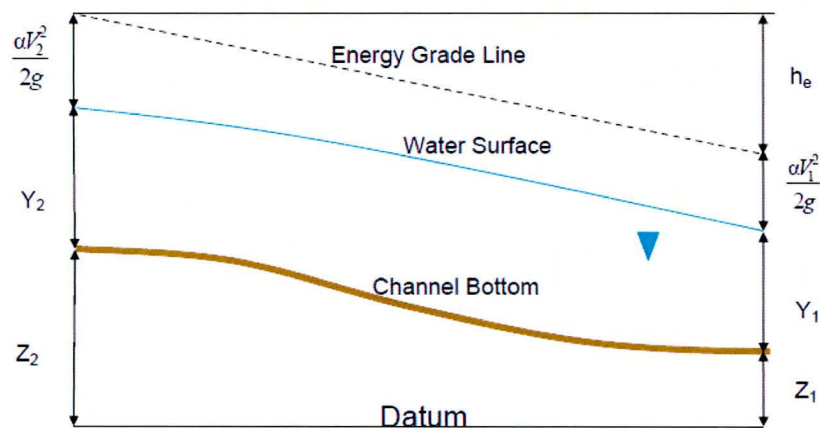


Figura 5.1 – Rappresentazione schematica dei profili del terreno, della corrente e dell'energia fra due sezioni

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  $\alpha$  (a sua volta "pesato"):

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

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

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

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  $J_f$  e quindi  $e$ , di conseguenza, viene valutato  $h_e$ ;
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:

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

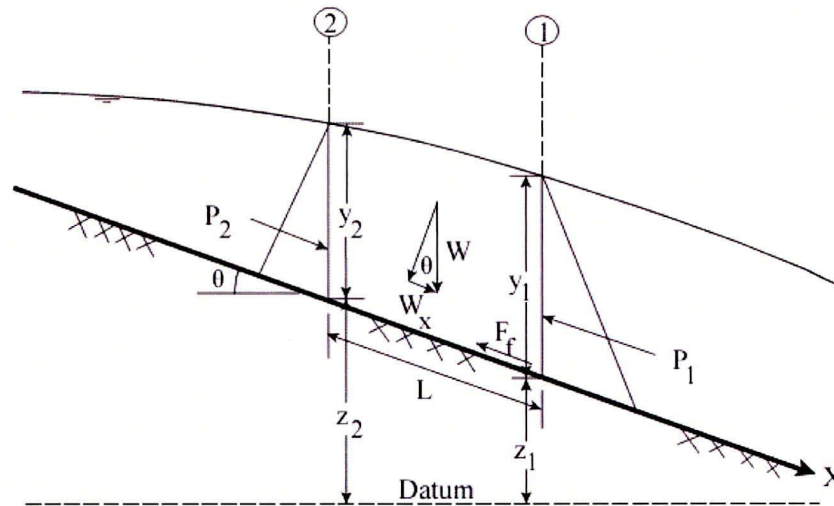


Figura 5.2 – Azioni esercitate sulla massa d'acqua

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;

$\rho$  = densità dell'acqua;

$\Delta V_x$  = cambio di velocità tra 2 e 1 nella direzione del moto.

Risolviendo 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.



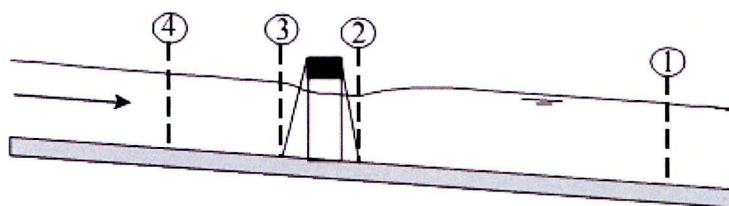


Figura 5.3 – Sezioni interessate dall'interferenza di un attraversamento con il moto a pelo libero dell'acqua

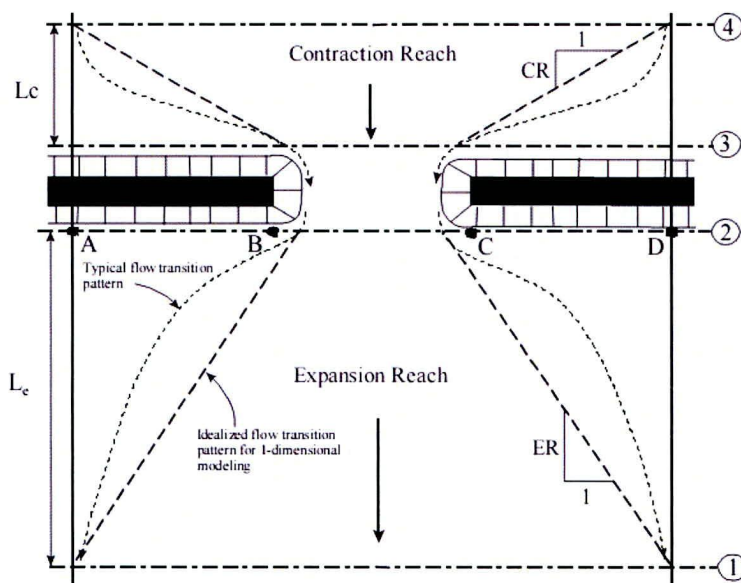


Figura 5.4 – Sezioni interessate dall'interferenza di un attraversamento con il moto a pelo libero dell'acqua

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 sviluppino 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.12.2 della Aquaveo Inc., di cui l'Autorità di Bacino della Puglia possiede 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



idrodinamiche. 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

$\zeta$  = 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;

$\mu$  = coefficiente di viscosità;

$p$  = pressione atmosferica;

$\rho$  = 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  $\mu$ , 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° 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><b>1° Step</b> Risolve l'equazione del moto nella direzione Y per la velocità <math>v</math>, utilizzando un metodo iterativo, che richiede 2 sweeps. Per il primo, 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><b>2° Step</b> Determina il tirante e la velocità <math>u</math> 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 generalmente 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 <math>x</math> e nel secondo step sono impiegate l'equazione di continuità e l'equazione del moto nella direzione Y.</p>

### LO SCHEMATISMO IDRAULICO

Nel presente studio, l'analisi idraulica è stata condotta, in una prima fase, in regime di moto permanente mediante l'implementazione di un modello monodimensionale (utilizzando il software di calcolo HEC-RAS) con riferimento ad eventi con tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni sugli impluvi principali di Lama Lamasinata che sottendono aree contribuenti di ampiezza superiore a 25 km<sup>2</sup> (che attraversano i territori comunali di Bitonto, Palo del Colle, Toritto, Binetto, Grumo Appula e Bitetto). Laddove i risultati dell'analisi monodimensionale sono apparsi poco rappresentativi per la particolare morfologia dei luoghi, si è resa necessaria la successiva implementazione di modelli bidimensionali, al fine di valutare l'impronta della piena, dei tiranti e delle velocità per i tempi di ritorno di riferimento.

Si sono valutati, inoltre, altri casi mediante l'implementazione di modelli bidimensionali in corrispondenza delle aree di interconnessione tra perimetrazioni idrauliche già esistenti e i tratti analizzati con i modelli monodimensionali.

Di seguito, si riporta la rappresentazione cartografica delle aree analizzate mediante modellazione idraulica bidimensionale.

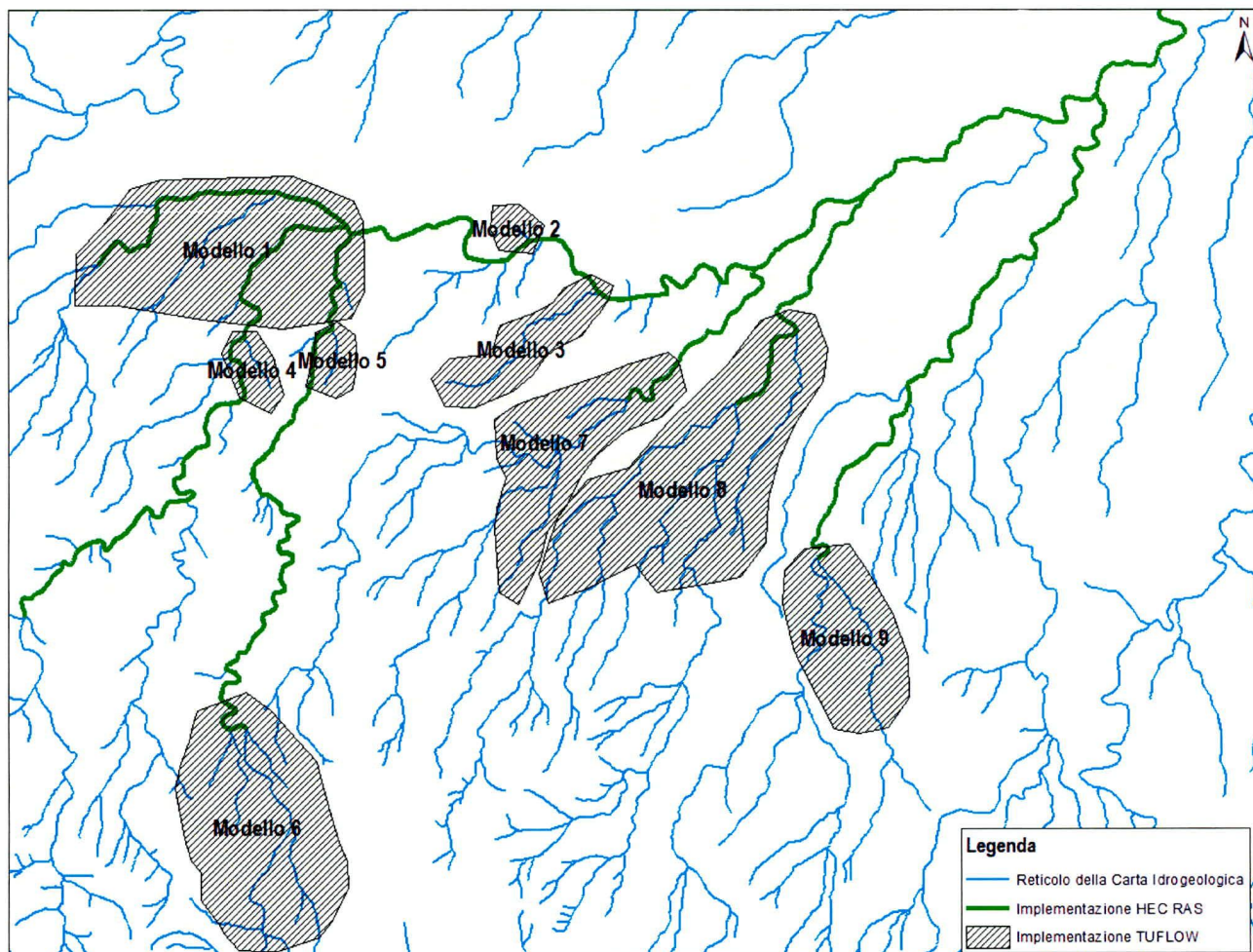


Figura 5.5 - Schematismo idraulico



## IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI IDRAULICI UTILIZZATI

### Applicazione Modello Monodimensionale

Per i principali impluvi del reticolo idrografico di Lama Lamasinata è stato realizzato un modello Hec-Ras, mediante procedimento Hec-GeoRAS implementato in ambiente GIS, consentendo sia la restituzione vettoriale che la definizione tabellare di sezioni trasversali tracciate, con passo significativo, lungo l'asse. In tale modello è stata possibile anche la rappresentazione geometrica dei principali attraversamenti idraulici avvalendosi di accurati rilievi in campo e documentazione fotografica. Il sistema di riferimento adottato è il WGS84-UTM 33 N.

Per ogni asta fluviale, sono rappresentati l'asse del corso d'acqua, le sue sponde e le tracce delle sezioni trasversali. L'asse del corso d'acqua (stream centerline) e le sponde in destra e sinistra idraulica (banks) sono stati digitalizzati in ambiente GIS sulla base del modello digitale del terreno e dell'ortofoto. Tali elementi sono necessari per individuare la direzione del corso d'acqua e la sua estensione morfologica. Le sezioni idrauliche (river station) sono state anch'esse tracciate in ambiente GIS con un passo di circa 100 metri ed in corrispondenza di variazioni di pendenza e di forma, nonché a monte e a valle delle opere di attraversamento idraulico.

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

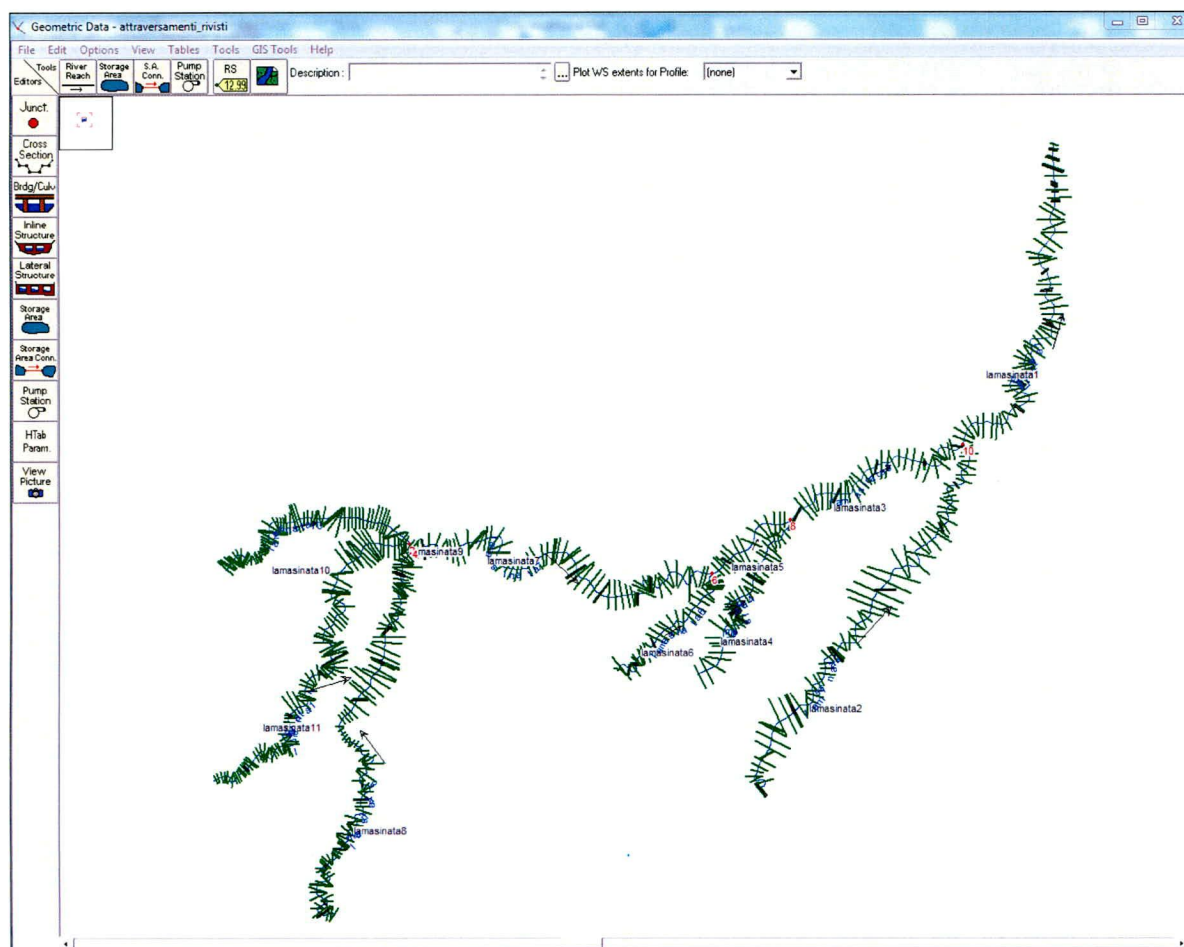


Figura 5.6 - Modello di calcolo idraulico monodimensionale: rappresentazione della ricostruzione della geometria del sistema in HEC-RAS

L'assetto morfologico del territorio di analisi è caratterizzato dalla presenza di una serie di infrastrutture viarie, che intersecano in più punti i corsi d'acqua con manufatti idraulici, inseriti anch'essi nelle modellazioni idrauliche mediante rappresentazione geometrica.

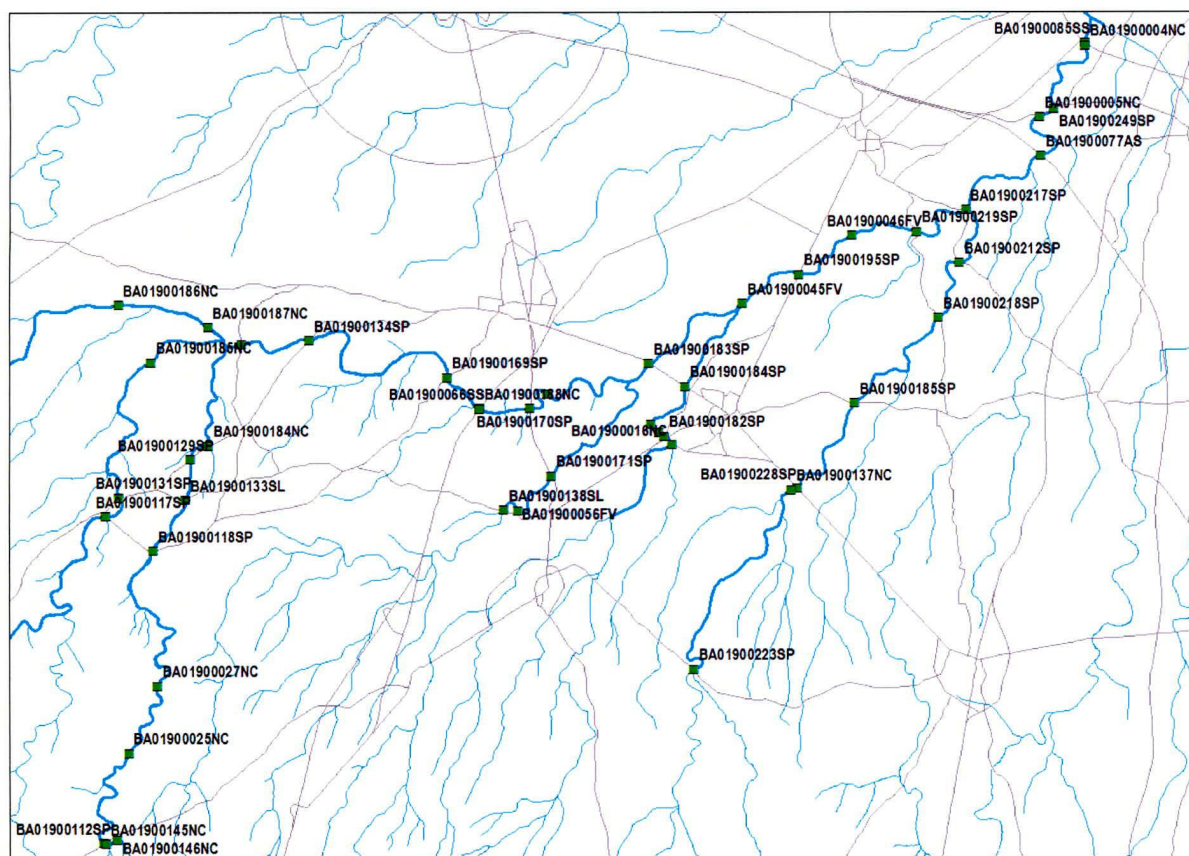


Figura 5.7 - Localizzazione degli attraversamenti idraulici (codificati) inseriti in HEC-RAS

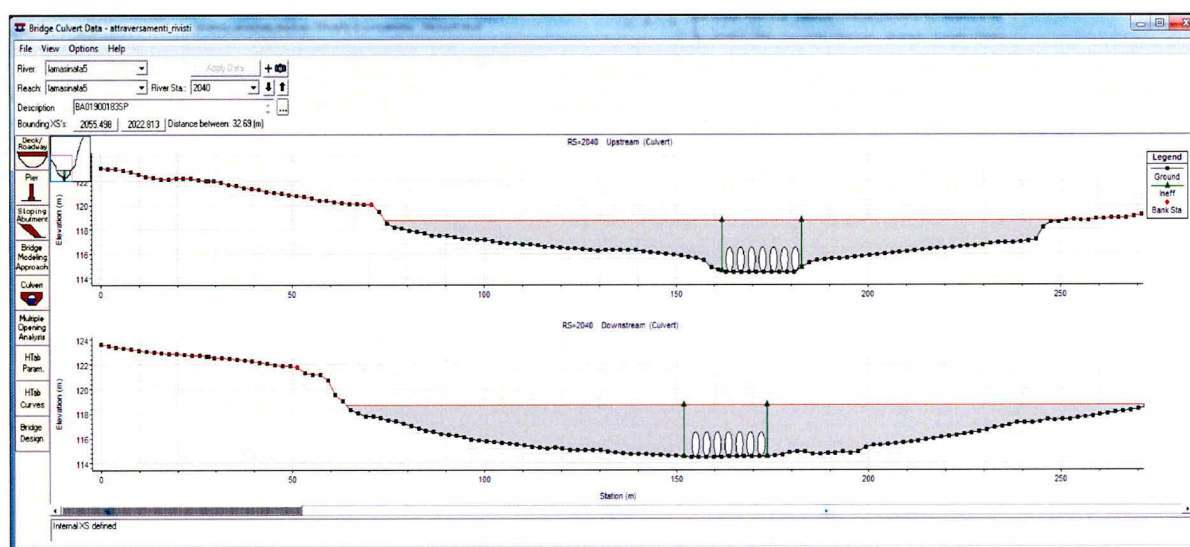


Figura 5.8 - Esempio di ponte inserito in HEC-RAS



Steady Flow Data - portate

File Options Help

Enter/Edit Number of Profiles (25000 max): 3 Reach Boundary Conditions ... Apply Data

Locations of Flow Data Changes

River: lamasinata3 Add Multiple...

Reach: lamasinata3 River Sta.: 5312.435 Add A Flow Change Location

Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates		
River	Reach	RS	Q30	Q200	Q500
1	lamasinata1	9797.518	180.2	329.1	353.3
2	lamasinata10	5520.561	43.3	77.6	95.7
3	lamasinata11	10501.23	48.4	87.4	108.1
4	lamasinata2	11866.22	42.1	81.3	102.1
5	lamasinata3	5312.435	142.8	255.6	256.6
6	lamasinata4	5251.255	53.2	94.9	106.7
7	lamasinata5	2338.211	100.2	180.3	222.8
8	lamasinata6	4071.852	32.5	58.1	71.5
9	lamasinata7	9764.148	84.8	153.3	189.7
10	lamasinata8	12317.76	26.4	47.9	59.4
11	lamasinata9	88.83085	91.7	165	203.8

Select river for adding a new flow change location.

Figura 5.9 - Modello di calcolo idraulico monodimensionale: schermata di inserimento dei valori di portata (in m³/s) in HEC-RAS

Attraversamento	N_UTM_ETRF	E_UTM_ETRF	T <sub>R</sub> = 30 anni	T <sub>R</sub> = 200 anni	T <sub>R</sub> = 500 anni
BA01900117SP	4542877.60	635879.61	ok	ok	ok
BA01900131SP	4543213.69	636100.34	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900185NC	4545602.49	636678.96	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900186NC	4546621.63	636099.66	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900187NC	4546221.21	637697.87	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900146NC	4537164.89	636069.01	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900145NC	4537092.76	635863.71	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900112SP	4537115.79	635826.57	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900025NC	4538708.08	636281.28	ok	ok	ok
BA01900027NC	4539894.37	636789.51	sommerso	sormonto	sormonto
BA01900118SP	4542267.31	636718.79	ok	ok	ok
BA01900133SL	4543171.95	637298.63	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900129SP	4543889.69	637384.83	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900136SL	4545916.41	638295.50	sommerso	sormonto	sormonto
BA01900134SP	4545989.59	639499.95	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900169SP	4545333.11	641969.10	ok	ok	ok
BA01900066SS	4544782.62	642533.43	ok	ok	ok
BA01900170SP	4544786.69	643438.75	ok	ok	ok
BA01900047FV	4545044.51	643741.01	ok	ok	ok
BA01900138SL	4542986.54	642973.09	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900056FV	4542975.66	643216.84	ok	ok	ok
BA01900171SP	4543593.19	643817.79	ok	sormonto	sormonto
BA01900183SP	4545580.62	645559.07	sormonto	sormonto	sormonto

Attraversamento	N_UTM_ETRF	E_UTM_ETRF	T <sub>R</sub> = 30 anni	T <sub>R</sub> = 200 anni	T <sub>R</sub> = 500 anni
BA01900016NC	4544142.71	645966.89	ok	ok	ok
BA01900182SP	4544289.94	645819.06	ok	ok	ok
BA01900048FV	4544353.45	645740.16	ok	ok	ok
BA01900049FV	4544496.17	645597.79	ok	ok	ok
BA01900184SP	4545175.61	646195.28	ok	sommerso	sommerso
BA01900045FV	4546632.78	647227.39	ok	ok	ok
BA01900195SP	4547150.45	648224.99	sommerso	sormonto	sormonto
BA01900046FV	4547839.86	649173.89	ok	ok	ok
BA01900219SP	4547906.02	650333.01	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900217SP	4548289.16	651203.61	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900223SP	4540173.93	646349.49	ok	sormonto	sormonto
BA01900137NC	4543342.88	648089.41	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900228SP	4543366.42	648189.53	ok	ok	ok
BA01900185SP	4544874.36	649221.82	sormonto	sormonto	sormonto
BA01900218SP	4546387.62	650717.27	ok	ok	ok
BA01900212SP	4547359.10	651084.60	ok	ok	ok

Tabella 5.1 - Risultati della simulazione idraulica monodimensionale relativamente agli attraversamenti

### Applicazione Modello Bidimensionale

Laddove i risultati dell'analisi monodimensionale sono apparsi poco rappresentativi per la particolare morfologia dei luoghi, si è resa necessaria la successiva implementazione di modelli bidimensionali, al fine di valutare l'impronta della piena, dei tiranti e delle velocità per i tempi di ritorno di riferimento.

Si sono valutati, inoltre, altri casi mediante l'implementazione di modelli bidimensionali in corrispondenza delle aree di interconnessione tra perimetrazioni idrauliche già esistenti e i tratti analizzati con i modelli monodimensionali.

### MODELLO 1

Il primo modello, studiato mediante l'implementazione di un modello bidimensionale, in regime di moto vario, interessa in parte 3 reticoli idrografici, denominati Lamasinata 10, Lamasinata 11 e Lamasinata 8, nello specifico i tratti prossimi alla confluenza con il reticolo denominato Lamasinata 7.

La modellazione monodimensionale, condotta in una prima fase, aveva fornito risultati poco rappresentativi in termini di aree allagabili, tiranti e velocità considerata la morfologia dei luoghi. Gli impluvi oggetto di studio sottendono bacini con aree comprese tra i 40 e i 60 km<sup>2</sup> e solcano i territori comunali di Bitonto e Palo del Colle.





Figura 5.10 – Rappresentazione del dominio di calcolo (tratteggio arancione) con indicazione delle condizioni di input (in rosso) e output (in verde)

Sulla base dei dati topografici al suolo derivanti dai rilievi LiDAR si è costruita una griglia con celle di calcolo di 5 m, caratterizzate dall'informazione altimetrica e dalla scabrezza fissata in base all'uso del suolo (secondo quanto riportato nella carta di Uso del Suolo della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5000).

Con riferimento alle condizioni al contorno si sono adottati gli idrogrammi di piena alle sezioni n. 1, 2 e 3 (Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13), mentre come condizione di valle quella di moto uniforme, definita dalla pendenza naturale del terreno.

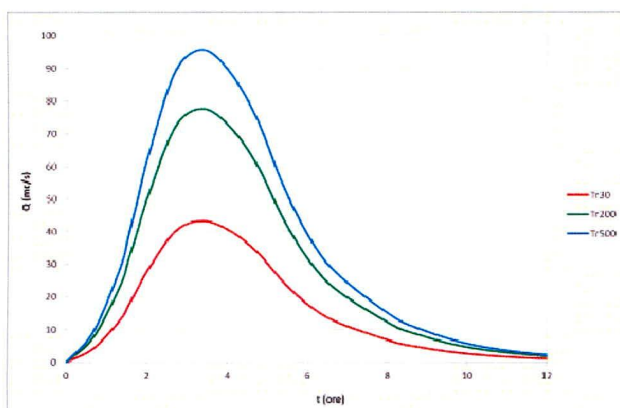


Figura 5.11 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura 1

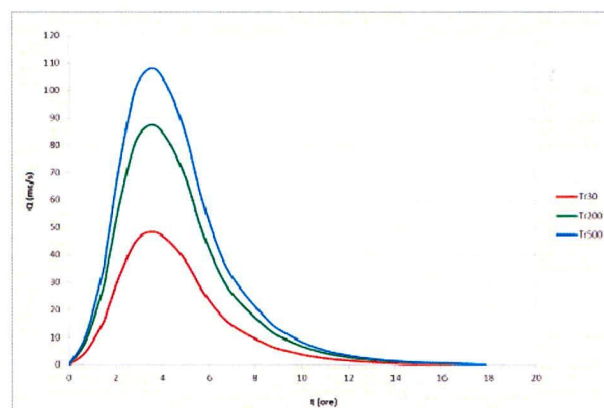


Figura 5.12 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura 2

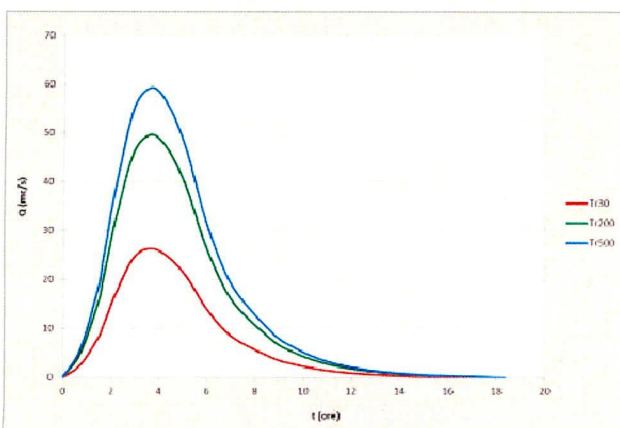


Figura 5.13 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura 3

### **MODELLO 2 E 3**

L'analisi idraulica mediante l'implementazione di un modello geometrico del tipo bidimensionale ha riguardato anche i reticoli minori al fine di valutare la completa attivazione degli stessi a seguito di un evento di pioggia.

Per l'implementazione di tali modelli idraulici ci si è avvalsi dei dati topografici al suolo derivanti dai rilievi LiDAR, che hanno permesso di definire un modello digitale del terreno con celle di calcolo pari a 5 m.

Come condizione al contorno di input è stata utilizzata la precipitazione distribuita in ogni cella del modello di calcolo, mentre come condizione di valle è stato inserito il livello idrico del corso d'acqua in cui si immette, desunto dai risultati delle modellazioni condotte in moto permanente. Nel dettaglio, per il MODELLO 2 sono stati inseriti i livelli idrici osservati, per i tre tempi di ritorno, alla sez. 5406.36, mentre per il MODELLO 3, alla sez. 3757.14, entrambi ricadenti nello stesso tratto denominato Lamasinata 7.

Si riporta di seguito la rappresentazione dei domini di calcolo dei reticoli idrografici menzionati.



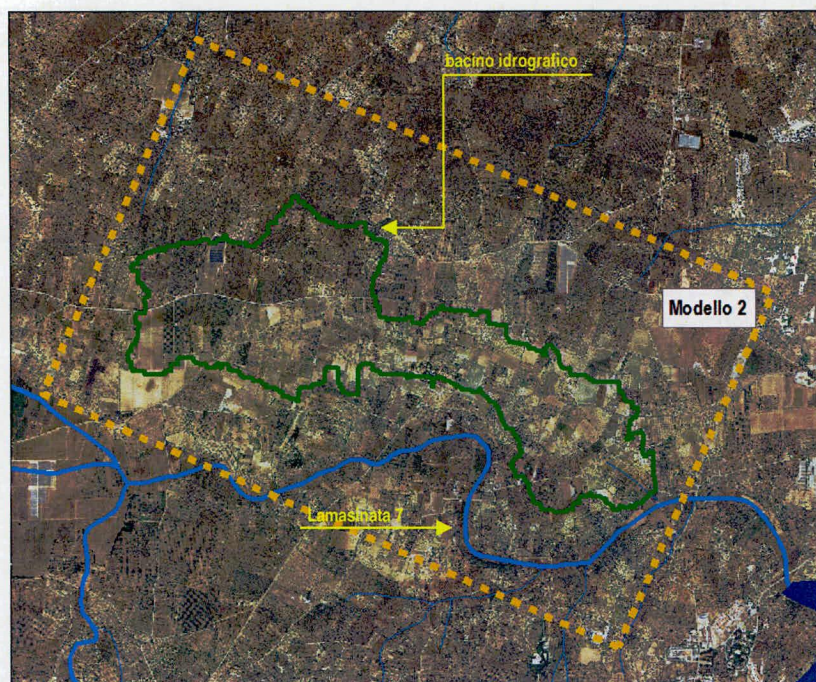


Figura 5.14 – Rappresentazione del dominio di calcolo (tratteggio arancione) del modello 2 e bacino del reticolo idrografico analizzato (in verde)

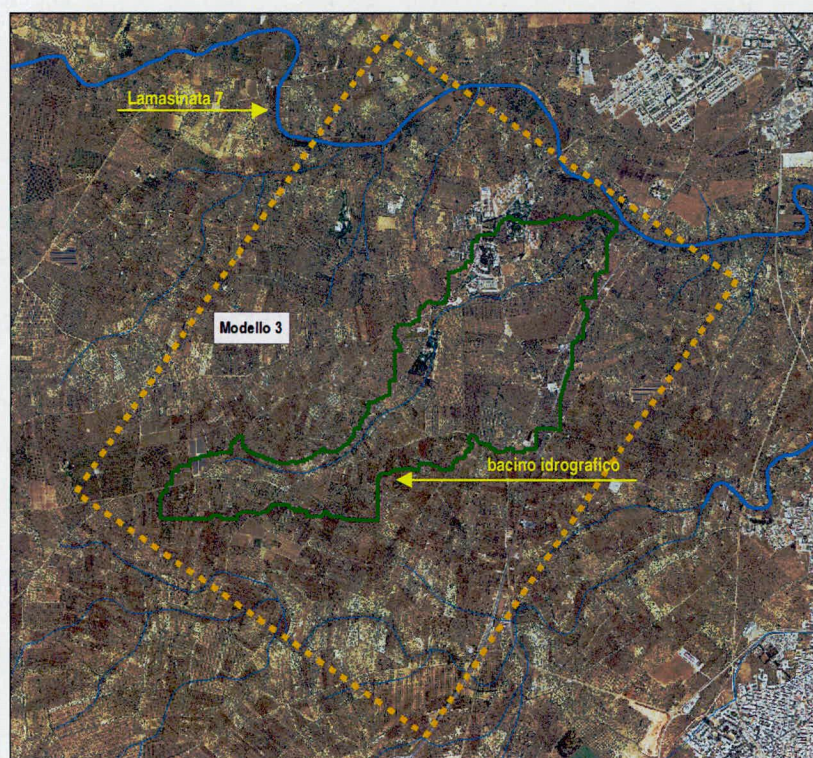


Figura 5.15 – Rappresentazione del dominio di calcolo del modello 3 e bacino del reticolo idrografico analizzato (in verde)

#### **MODELLO 4 e 5**

Gli impluvi oggetto dei seguenti modelli idraulici ricadono entrambi nel territorio comunale di Palo del Colle. Per l'implementazione di tali modelli idraulici si è avvalsi dei dati topografici al suolo derivanti dai rilievi LiDAR, che hanno permesso di definire un modello digitale del terreno con celle di calcolo pari a 5 m.



Come condizione al contorno di input è stata utilizzata la precipitazione distribuita in ogni cella del modello di calcolo, mentre come condizione di valle è stato inserito il livello idrico del corso d'acqua principale, risultante dalle modellazioni condotte in moto permanente. Nel dettaglio per il MODELLO 4 sono stati inseriti i livelli idrici osservati, per i tre tempi di ritorno, alla sez. 3589.165 del tratto denominato Lamasinata 11; per il MODELLO 5 sono stati inseriti i livelli idrici osservati, per i tre tempi di ritorno, alla sez. 1895.433 del tratto denominato Lamasinata 8.

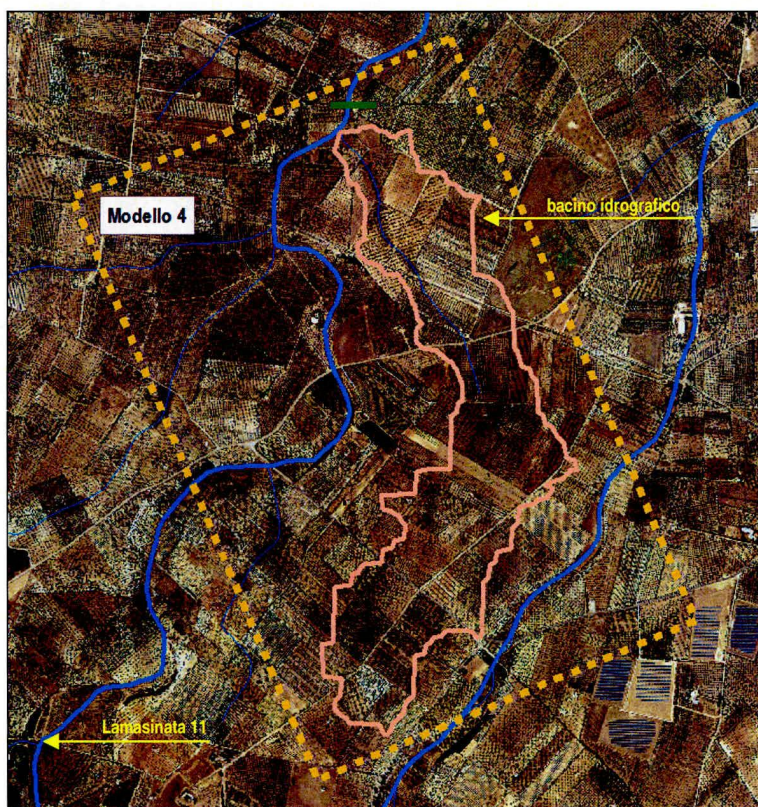


Figura 5.16 – Rappresentazione del dominio di calcolo con indicazione delle condizioni di output (in verde) del modello 4 e bacino del reticolo idrografico analizzato (in arancione)



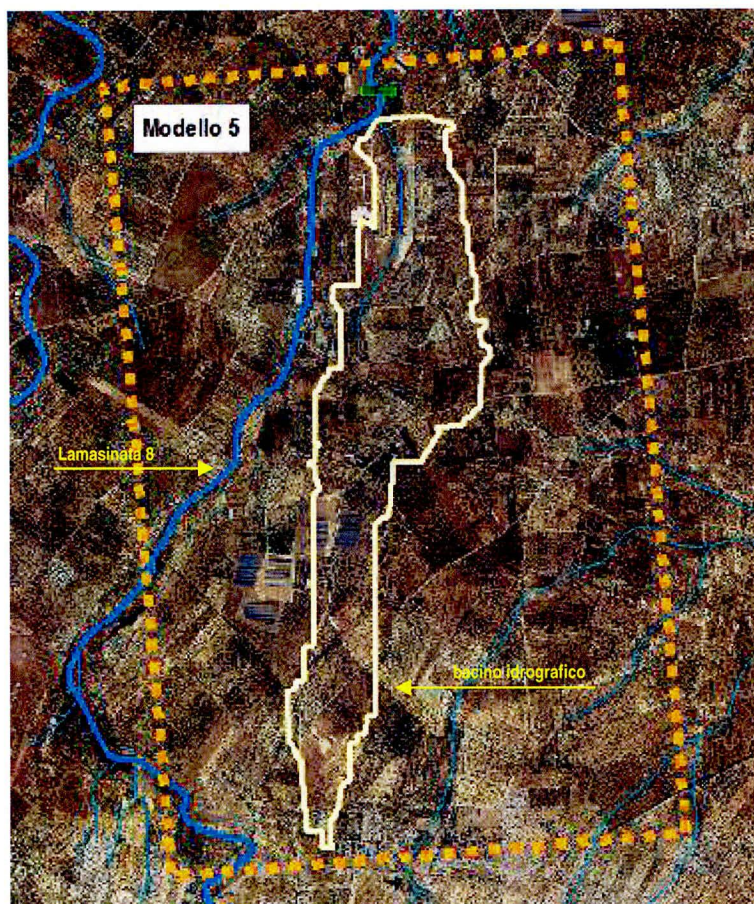


Figura 5.17 – Rappresentazione del dominio di calcolo con indicazione delle condizioni di output (in verde) del modello 5 e bacino del reticolo idrografico analizzato (in giallo chiaro)

<b>Modello 4</b>	<b>INPUT - precipitazione distribuita [mm/h]</b>	<b>OUTPUT - livello idrico già noto [m s.l.m.]</b>
Tr30	10.12	214.07
Tr200	19.76	214.54
Tr500	24.73	214.70

<b>Modello 5</b>	<b>INPUT - precipitazione distribuita [mm/h]</b>	<b>OUTPUT - livello idrico già noto [m s.l.m.]</b>
Tr30	10.15	206.54
Tr200	19.80	206.81
Tr500	24.77	206.88

## MODELLO 6

Il MODELLO 6, studiato mediante l'implementazione di un modello bidimensionale, in regime di moto vario, ricade entro i limiti amministrativi del Comune di Toritto e in più piccola parte entro quelli del Comune di Grumo Appula, andando a sovrapporre alla perimetrazione idraulica già esistente. Si riporta di seguito la rappresentazione del dominio di calcolo per il bacino in analisi.



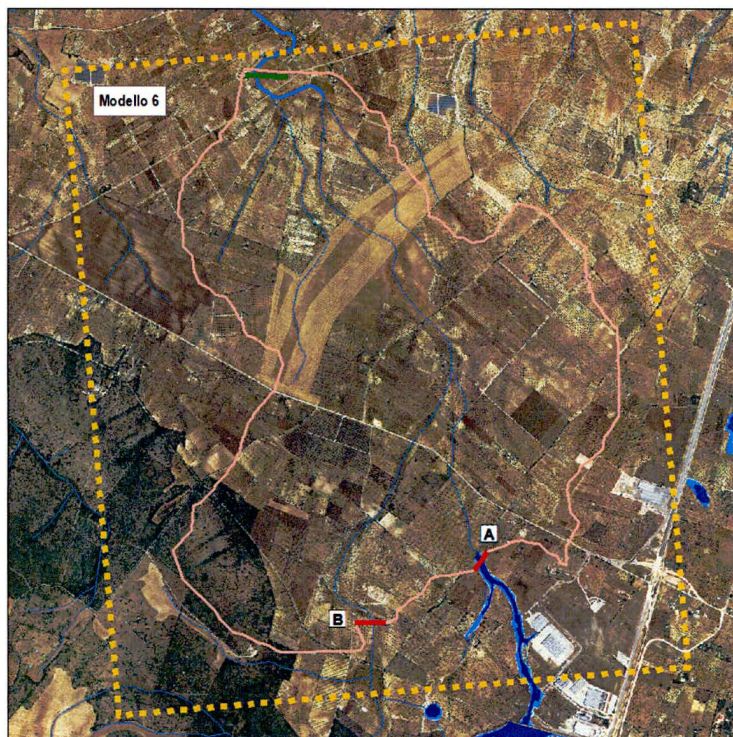


Figura 5.18 – Rappresentazione del dominio di calcolo con indicazione delle condizioni di input (in rosso) e output (in verde) e bacino del reticolo idrografico analizzato (in arancione)

La propagazione dell'onda di piena lungo i reticoli di interesse è stata simulata attraverso l'implementazione di un modello geometrico del tipo bidimensionale. Sulla base dei dati topografici al suolo derivanti dai rilievi LiDAR si è costruita una griglia con celle di calcolo di 5 m, caratterizzate dall'informazione altimetrica e dalla scabrezza fissata in base all'uso del suolo (secondo quanto riportato nella carta di Uso del Suolo della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5000). Di seguito, la rappresentazione della ricostruzione della geometria del tratto in analisi, vista 3D.

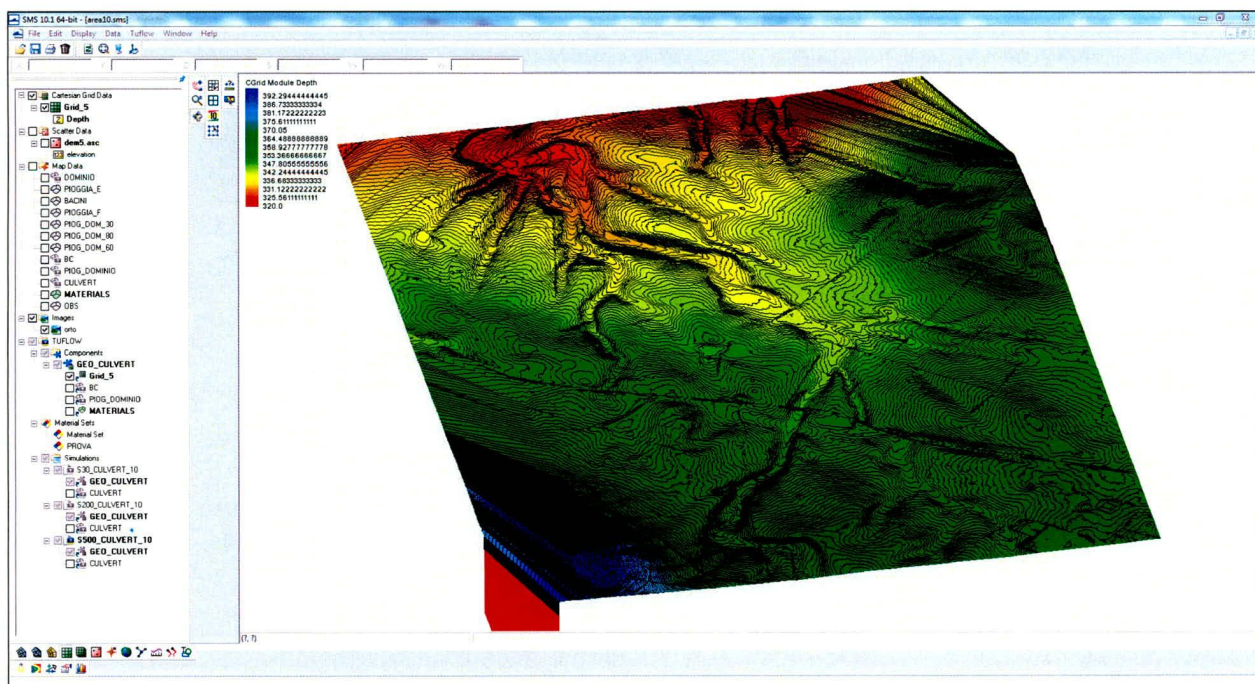


Figura 5.19 – Ricostruzione della geometria del modello analizzato, vista 3D



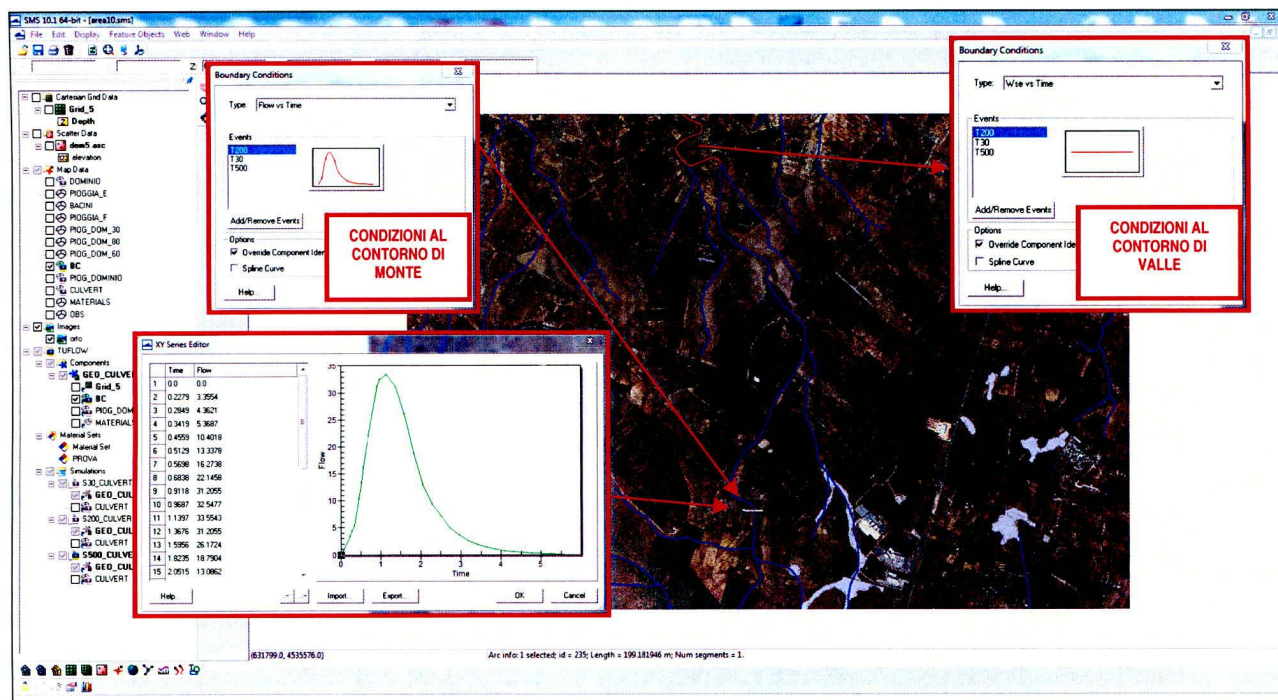


Figura 5.20 – Sezioni di inserimento delle condizioni al contorno (monte e valle) nel modello analizzato

Come condizioni al contorno di input sono stati utilizzati gli idrogrammi di piena in corrispondenza delle sezioni di chiusura A e B e la precipitazione distribuita in ogni cella del dominio di calcolo, mentre come condizione di valle è stato inserito il livello idrico del corso d'acqua principale, desunto dai risultati della modellazione monodimensionale condotta in moto permanente. Nel dettaglio, è stato inserito il livello idrico osservato, per i tre tempi di ritorno, alla sez. 11777.98 del tratto denominato Lamasinata 8.

Modello 6	INPUT - precipitazione distribuita [mm/h]			INPUT - portata al picco [m <sup>3</sup> /s]		OUTPUT - livello idrico già noto [m s.l.m.]
	30	60	90	A	B	
Tr30	0.27	6.14	12.80	3.82	15.35	322.86
Tr200	2.25	12.95	21.50	7.73	33.55	323.08
Tr500	3.75	16.56	25.77	9.77	43.33	323.18



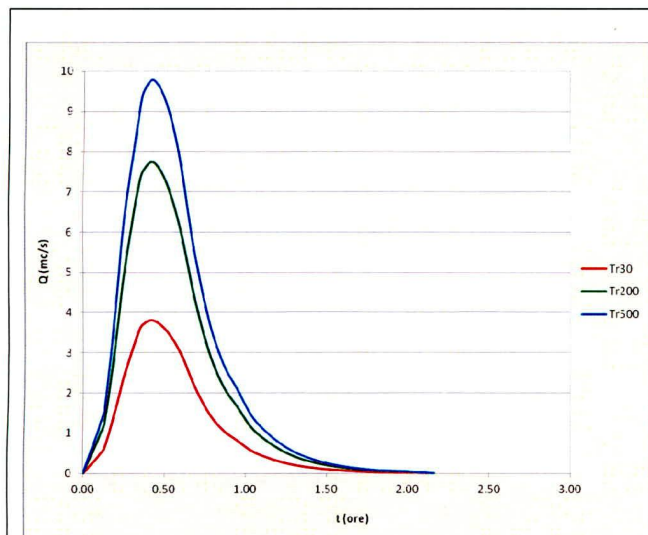


Figura 5.21 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura A

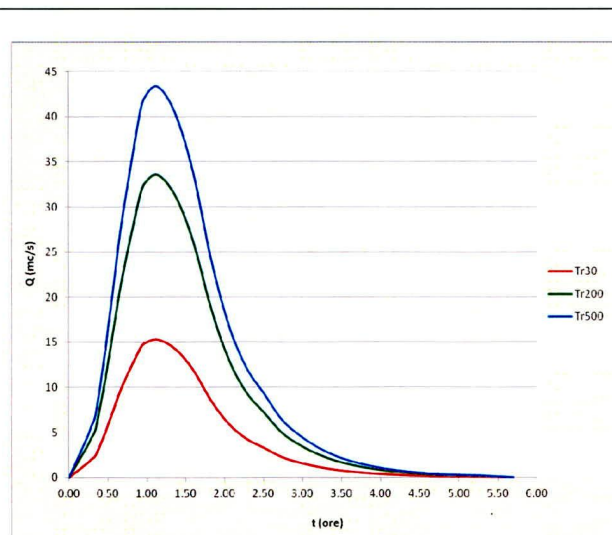


Figura 5.22 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura B

## MODELLO 7

Il MODELLO 7, studiato mediante l'implementazione di un modello bidimensionale, in regime di moto vario, ricade entro i limiti amministrativi del Comune di Binetto, Palo del Colle e Toritto.

Si riporta di seguito la rappresentazione del dominio di calcolo per il bacino in analisi.

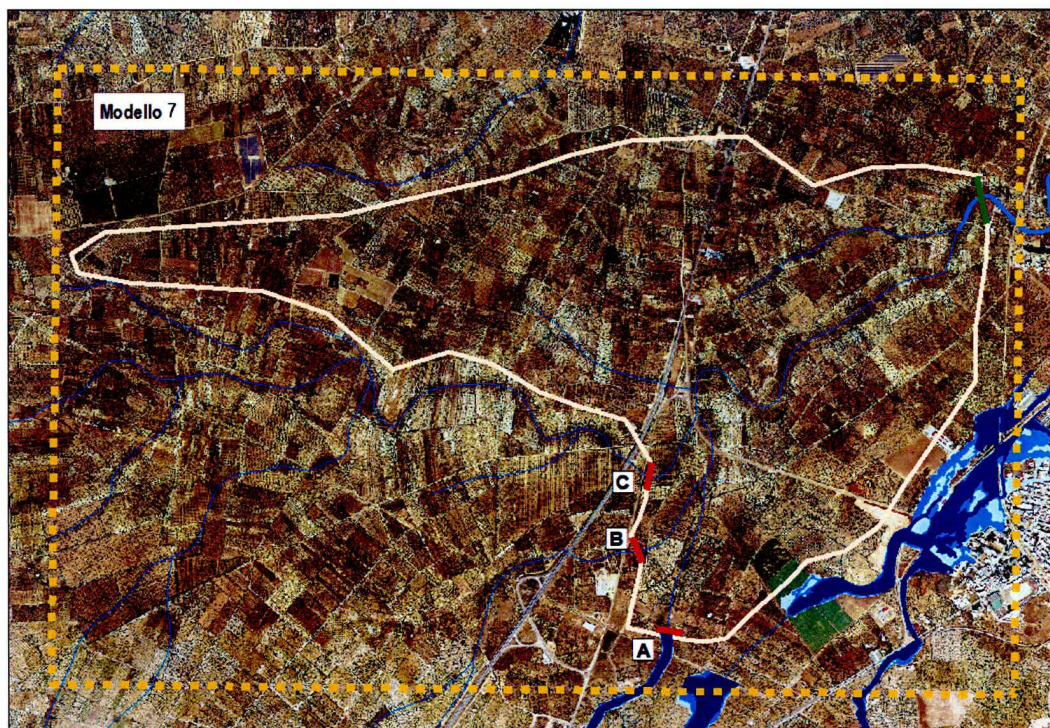


Figura 5.23 – Rappresentazione del dominio di calcolo con indicazione delle condizioni di input (in rosso) e output (in verde) e bacino del reticolo idrografico analizzato (in giallo chiaro)



Sulla base dei dati topografici al suolo derivanti dai rilievi LiDAR si è costruita una griglia con celle di calcolo di 5 m, caratterizzate dall'informazione altimetrica e dalla scabrezza fissata in base all'uso del suolo (secondo quanto riportato nella carta di Uso del Suolo della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5000).

Come condizioni al contorno di input sono stati utilizzati sia gli idrogrammi di piena in corrispondenza delle sezioni di chiusura A, B e C sia la precipitazione distribuita in ogni cella del modello di calcolo, mentre come condizione di valle è stato inserito il livello idrico del corso d'acqua principale, desunto dai risultati della modellazione monodimensionale condotta in moto permanente. Nel dettaglio, è stato inserito il livello idrico osservato, per i tre tempi di ritorno, alla sez. 4006.685 del tratto denominato Lamasinata 6.

Modello 7	INPUT - precipitazione distribuita [mm/h]	INPUT - portata al picco [m <sup>3</sup> /s]			OUTPUT - livello idrico già noto [m s.l.m.]
		A	B	C	
Tr30	6.88	4.3	13.67	14.09	167.90
Tr200	12.80	8.2	26.32	36.63	168.28
Tr500	15.80	10.5	32.80	33.24	171.48

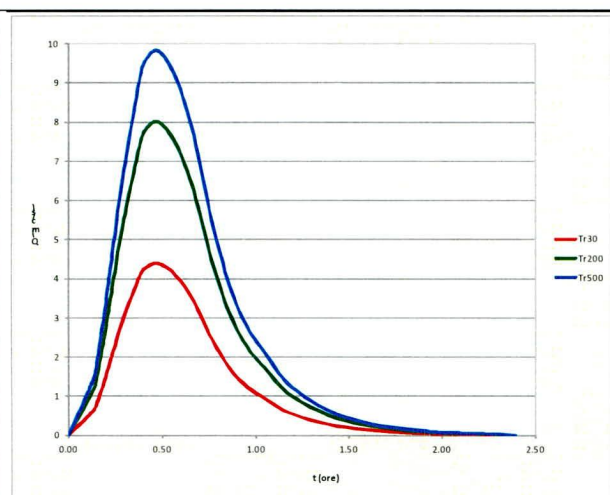


Figura 5.24 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura A

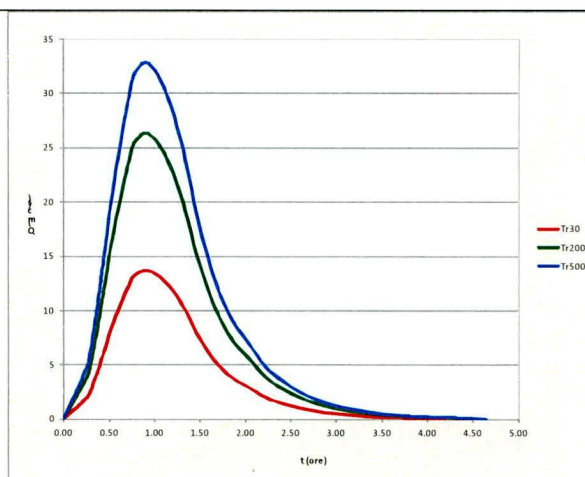


Figura 5.25 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura B

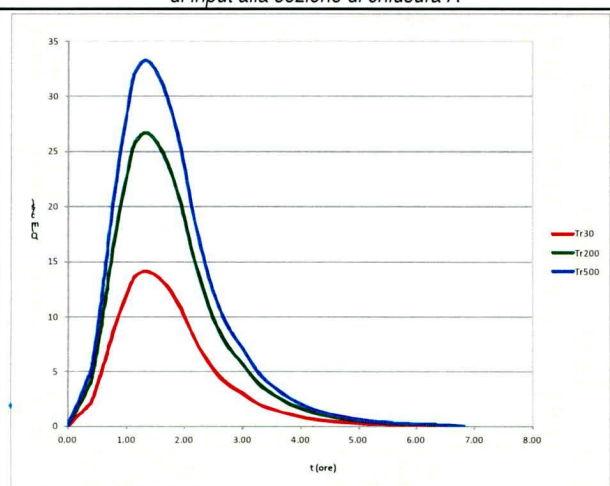


Figura 5.26 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura C



## MODELLO 8

Il MODELLO 8, studiato mediante l'implementazione di un modello bidimensionale, in regime di moto vario, ricade entro i limiti amministrativi del Comune di Binetto, Palo del Colle e Toritto.

Si riporta di seguito la rappresentazione del dominio di calcolo per il bacino in analisi.

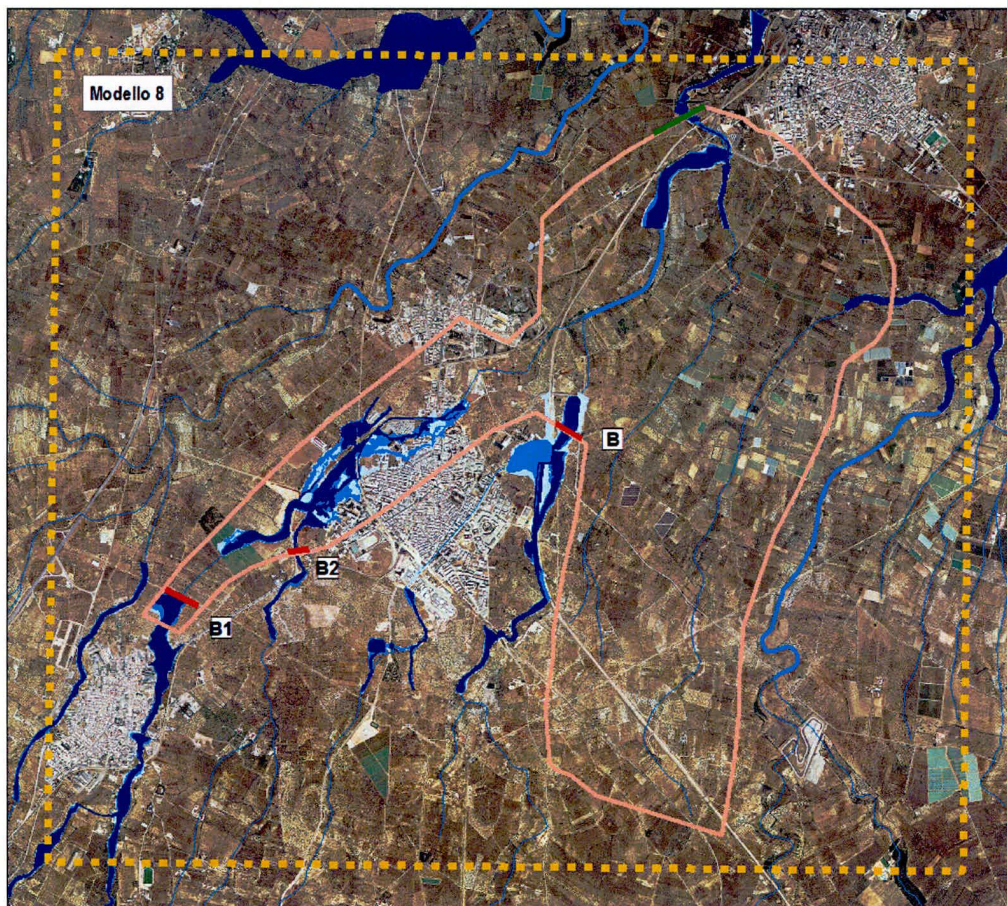


Figura 5.27 – Rappresentazione del dominio di calcolo con indicazione delle condizioni di input (in rosso) e output (in verde) e bacino del reticolo idrografico analizzato (in arancione)

Sulla base dei dati topografici al suolo derivanti dai rilievi LiDAR si è costruita una griglia con celle di calcolo di 5 m, caratterizzate dall'informazione altimetrica e dalla scabrezza fissata in base all'uso del suolo (secondo quanto riportato nella carta di Uso del Suolo della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5000).

Come condizioni al contorno di input sono stati utilizzati sia gli idrogrammi di piena in corrispondenza delle sezioni di chiusura B1, B2 e B sia la precipitazione distribuita in ogni cella del modello di calcolo, mentre come condizione di valle è stato inserito il livello idrico del corso d'acqua principale, desunto dai risultati della modellazione monodimensionale condotta in moto permanente. Nel dettaglio, è stato inserito il livello idrico osservato, per i tre tempi di ritorno, alla sez. 2958.086 del tratto denominato Lamasinata 4.

Modello 8	INPUT - precipitazione distribuita [mm/h]	INPUT - portata al picco [m³/s]			OUTPUT - livello idrico già noto [m s.l.m.]
		B1	B2	B	
Tr30	7.86	12.00	3.72	15.00	133.20
Tr200	14.04	25.16	7.59	30.00	133.43
Tr500	17.13	32.12	9.63	37.00	133.49



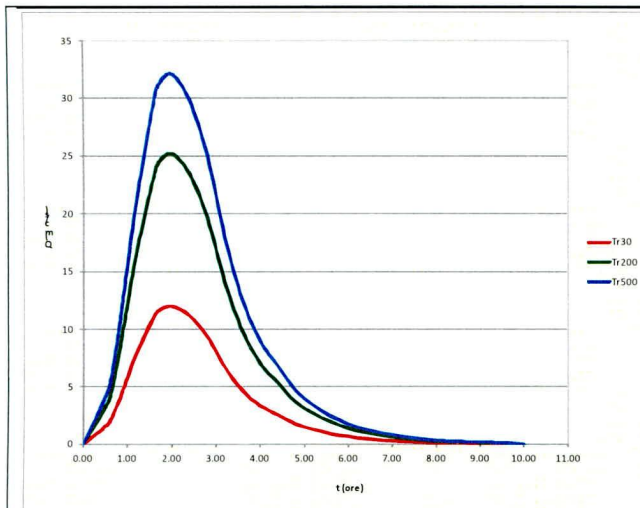


Figura 5.28 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura B1

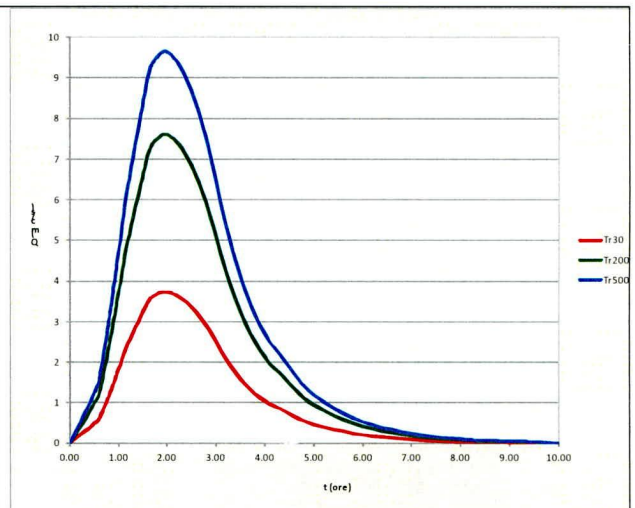


Figura 5.29 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura B2

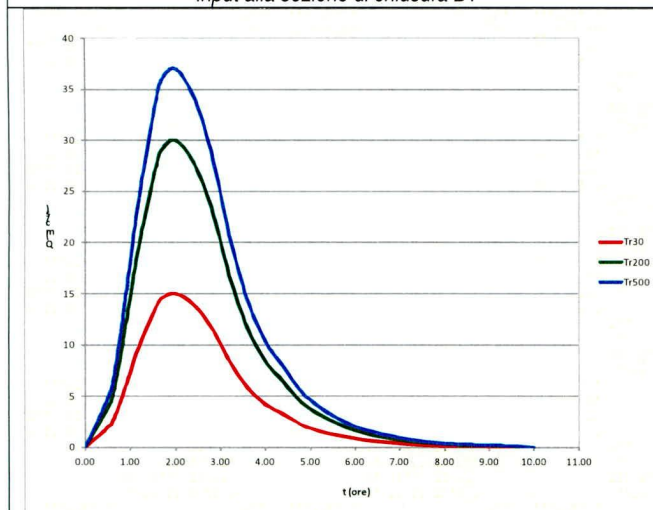


Figura 5.30 – Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura B

## **MODELLO 9**

Il MODELLO 9, studiato mediante l'implementazione di un modello bidimensionale, in regime di moto vario, ricade entro i limiti amministrativi del Comune di Binetto. Si riporta di seguito la rappresentazione del dominio di calcolo per il bacino in analisi.

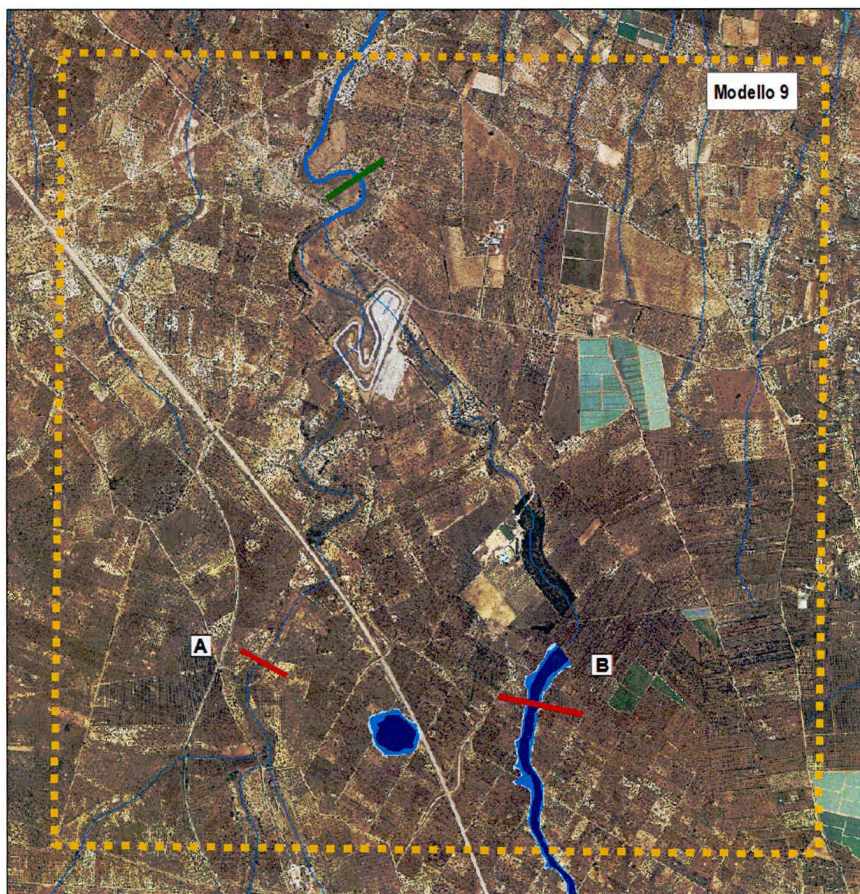


Figura 5.31 – Rappresentazione del dominio di calcolo con indicazione delle condizioni di input (in rosso) e output (in verde)

Sulla base dei dati topografici al suolo derivanti dai rilievi LiDAR si è costruita una griglia con celle di calcolo di 5 m, caratterizzate dall'informazione altimetrica e dalla scabrezza fissata in base all'uso del suolo (secondo quanto riportato nella carta di Uso del Suolo della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5000).

Come condizioni al contorno di input sono stati utilizzati sia gli idrogrammi di piena in corrispondenza delle sezioni di chiusura A e B sia la precipitazione distribuita in ogni cella del modello di calcolo, mentre come condizione di valle è stato inserito il livello idrico del corso d'acqua principale, desunto dai risultati della modellazione monodimensionale condotta in moto permanente. Nel dettaglio, è stato inserito il livello idrico osservato, per i tre tempi di ritorno, alla sez. 11233.06 del tratto denominato Lamasinata 2.

Modello 9	INPUT - portata al picco [m <sup>3</sup> /s]		OUTPUT - livello idrico già noto [m s.l.m.]
	A	B	
Tr30	23.38	4.23	174.19
Tr200	44.66	12.56	174.46
Tr500	56.01	16.69	174.77



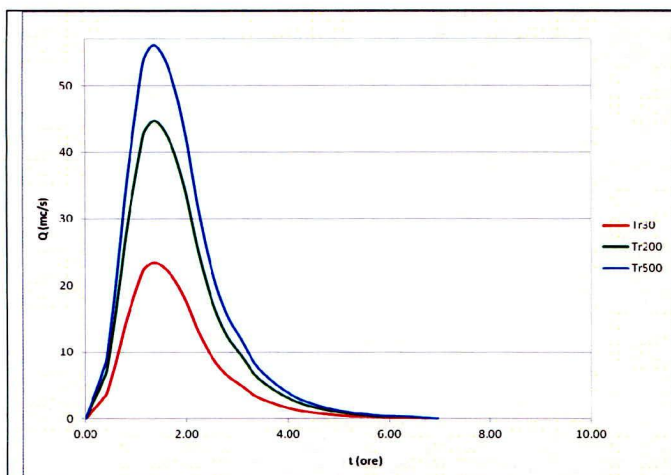


Figura 5.32 - Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura A

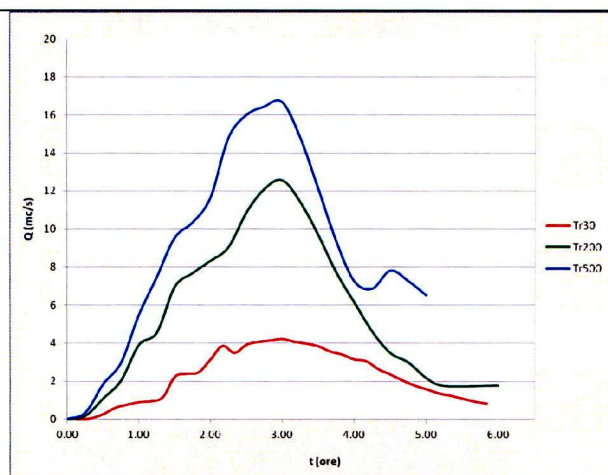


Figura 5.33 - Idrogramma di piena rappresentativo della condizione di input alla sezione di chiusura B

## 6 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 dall'asta principale della Lama Lamasinata. 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 tutte le analisi eseguite. Per i modelli 2D le due grandezze, tiranti e velocità, sono state opportunamente combinate secondo la relazione  $d(t) \cdot (0.5/1.3) \cdot v(t) > 0.2$  che corrisponde al valore massimo temporale della combinazione tiranti/velocità, calcolato per ogni cella della griglia di calcolo, valutata per i tre tempi di ritorno di riferimento: 30, 200 e 500 anni.

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.

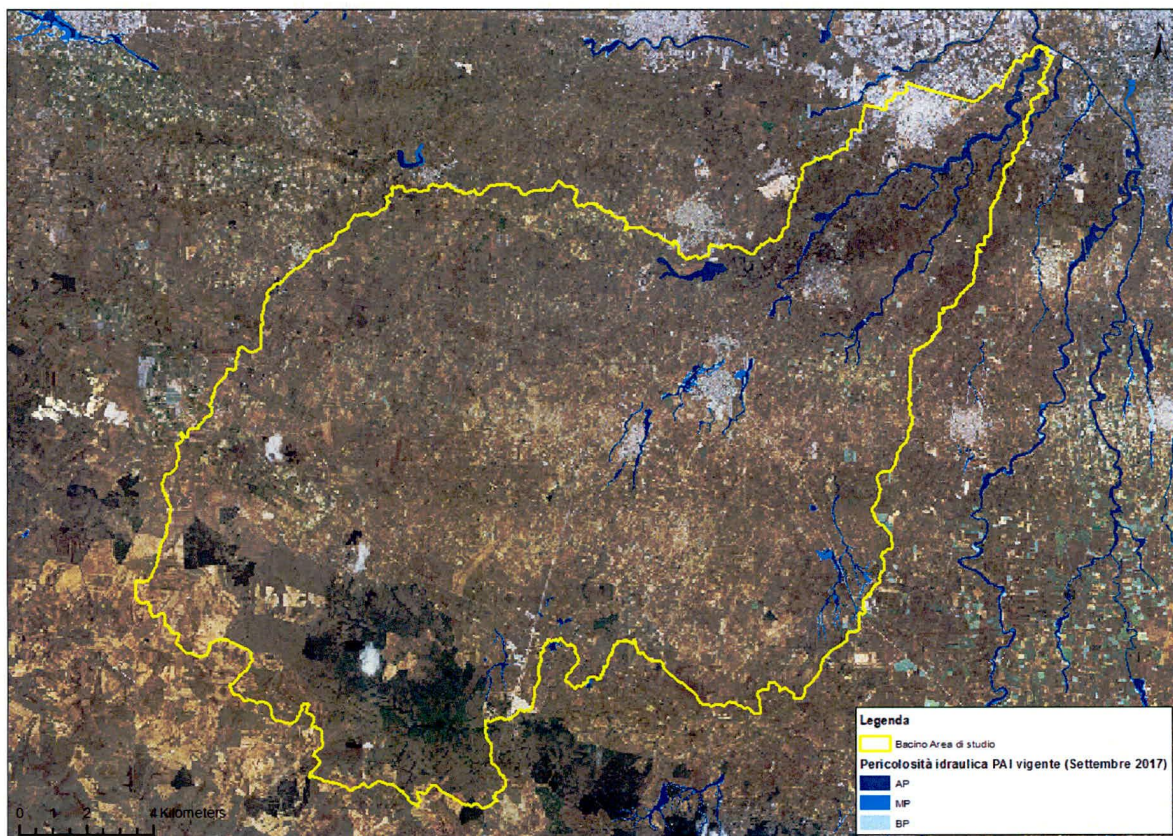


Figura 6.1 - PAI vigente su ortofoto



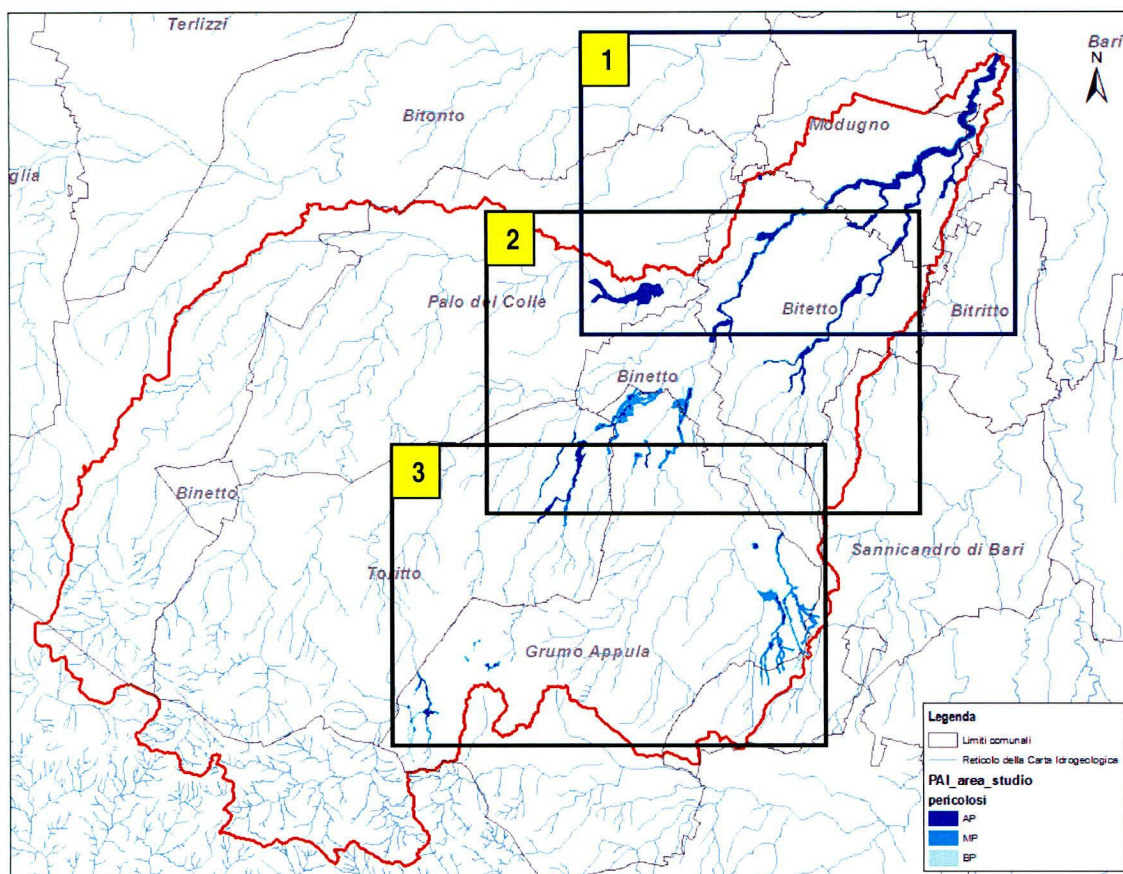


Figura 6.2 - PAI vigente nell'area di studio

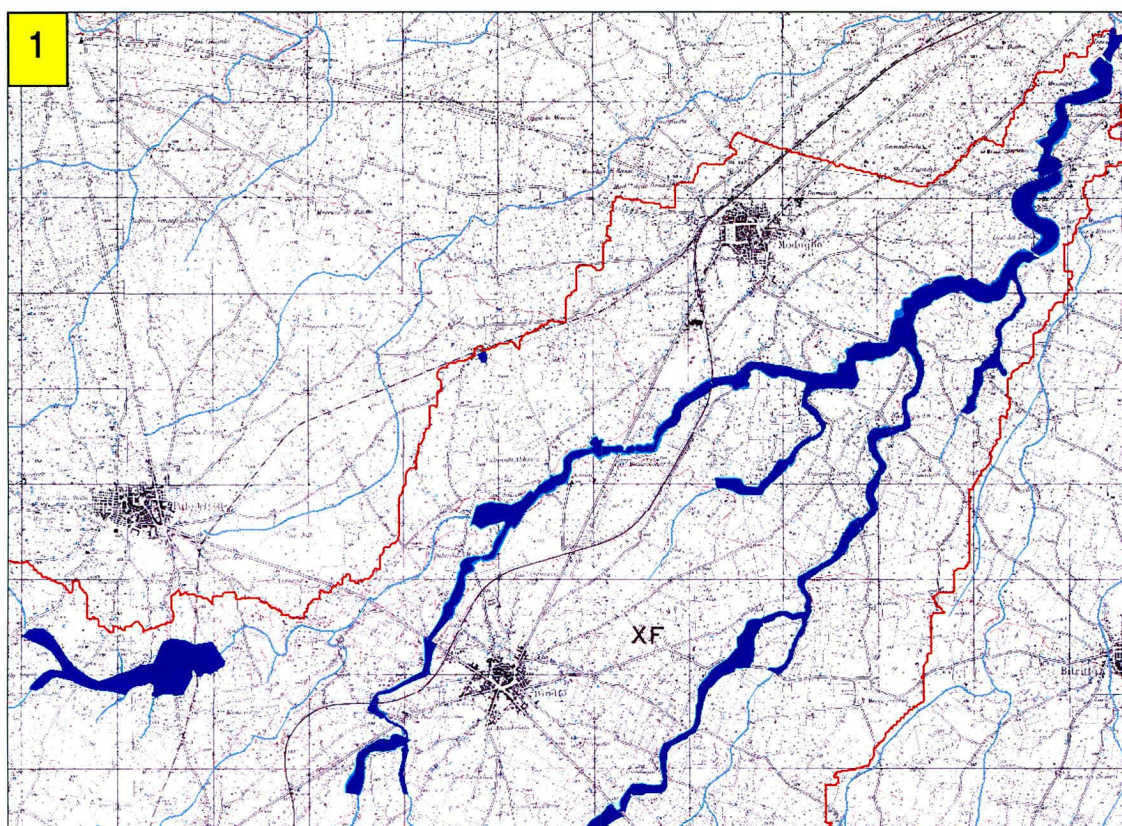


Figura 6.3 - Stralcio n. 1 del PAI vigente nell'area di studio su cartografia ufficiale I.G.M. 1:25.000



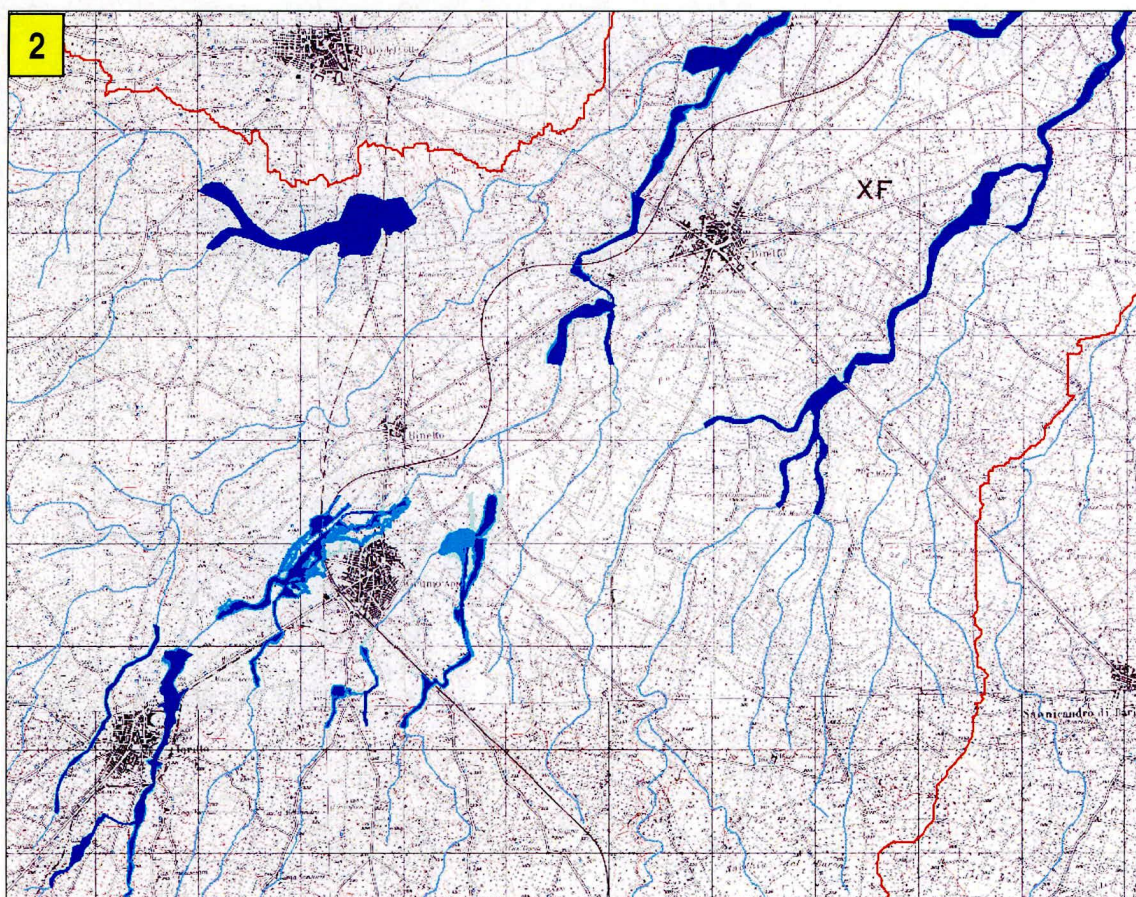


Figura 6.4 - Stralcio n. 2 del PAI vigente nell'area di studio su cartografia ufficiale I.G.M. 1:25.000

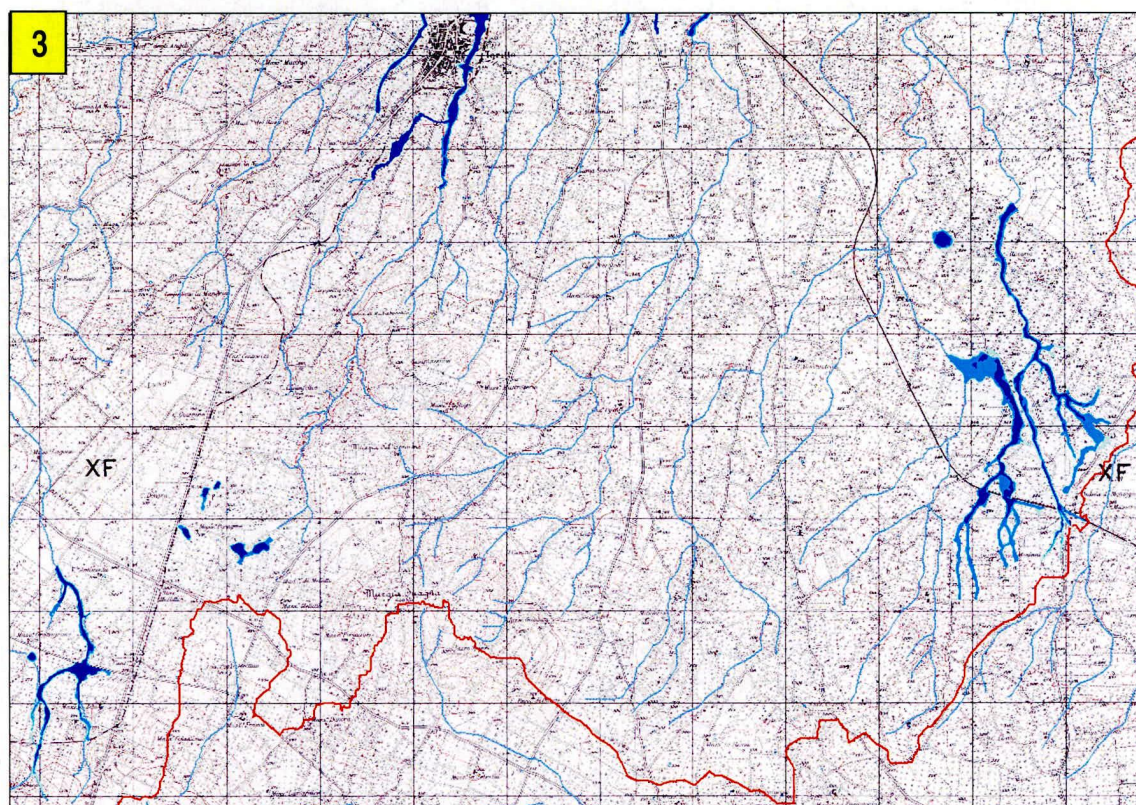


Figura 6.5 - Stralcio n. 3 del PAI vigente nell'area di studio su cartografia ufficiale I.G.M. 1:25.000



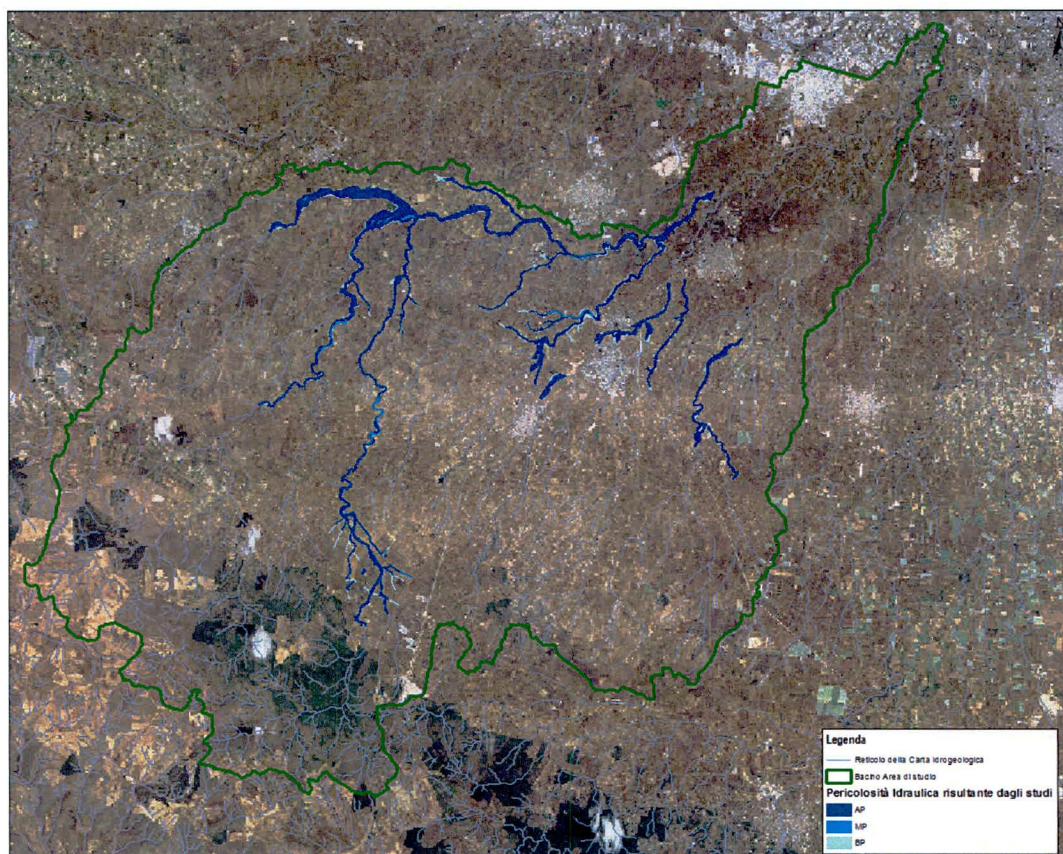


Figura 6.6 - Nuove aree a diversa pericolosità idraulica da inserire nel PAI su ortofoto

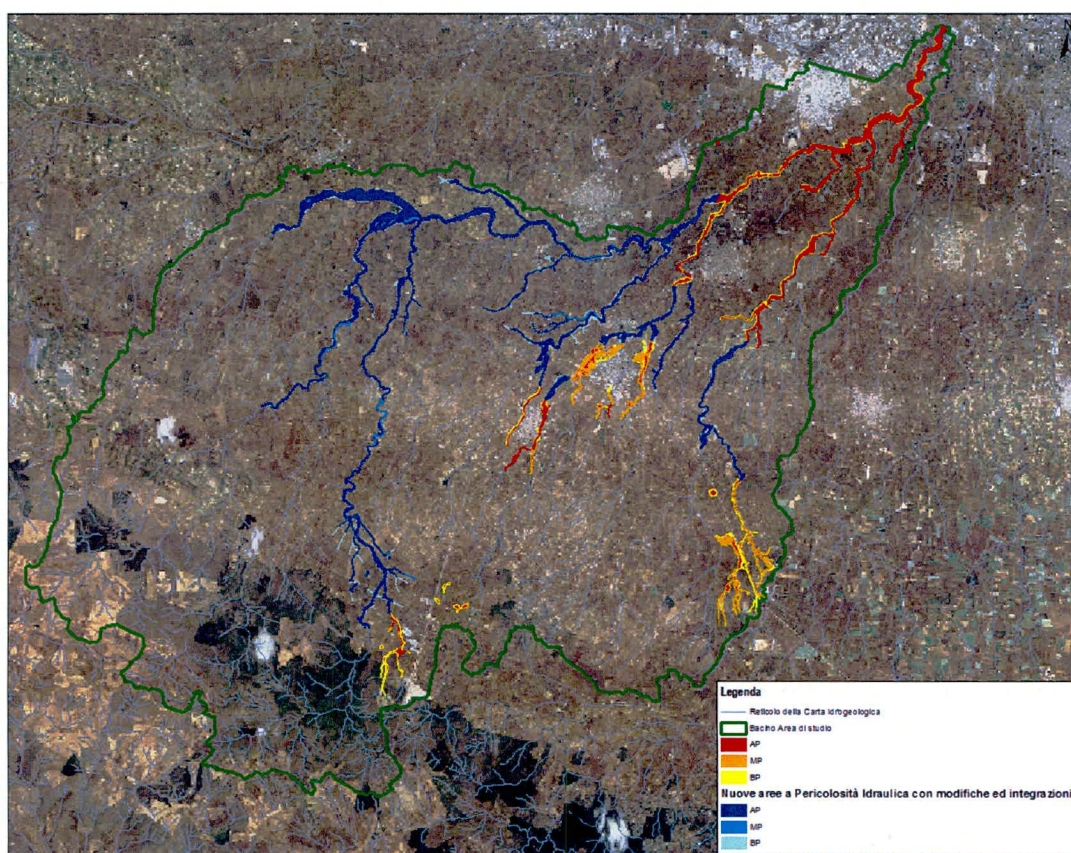


Figura 6.7 - Nuove aree a diversa pericolosità idraulica da inserire nel PAI e aree del PAI vigente su ortofoto



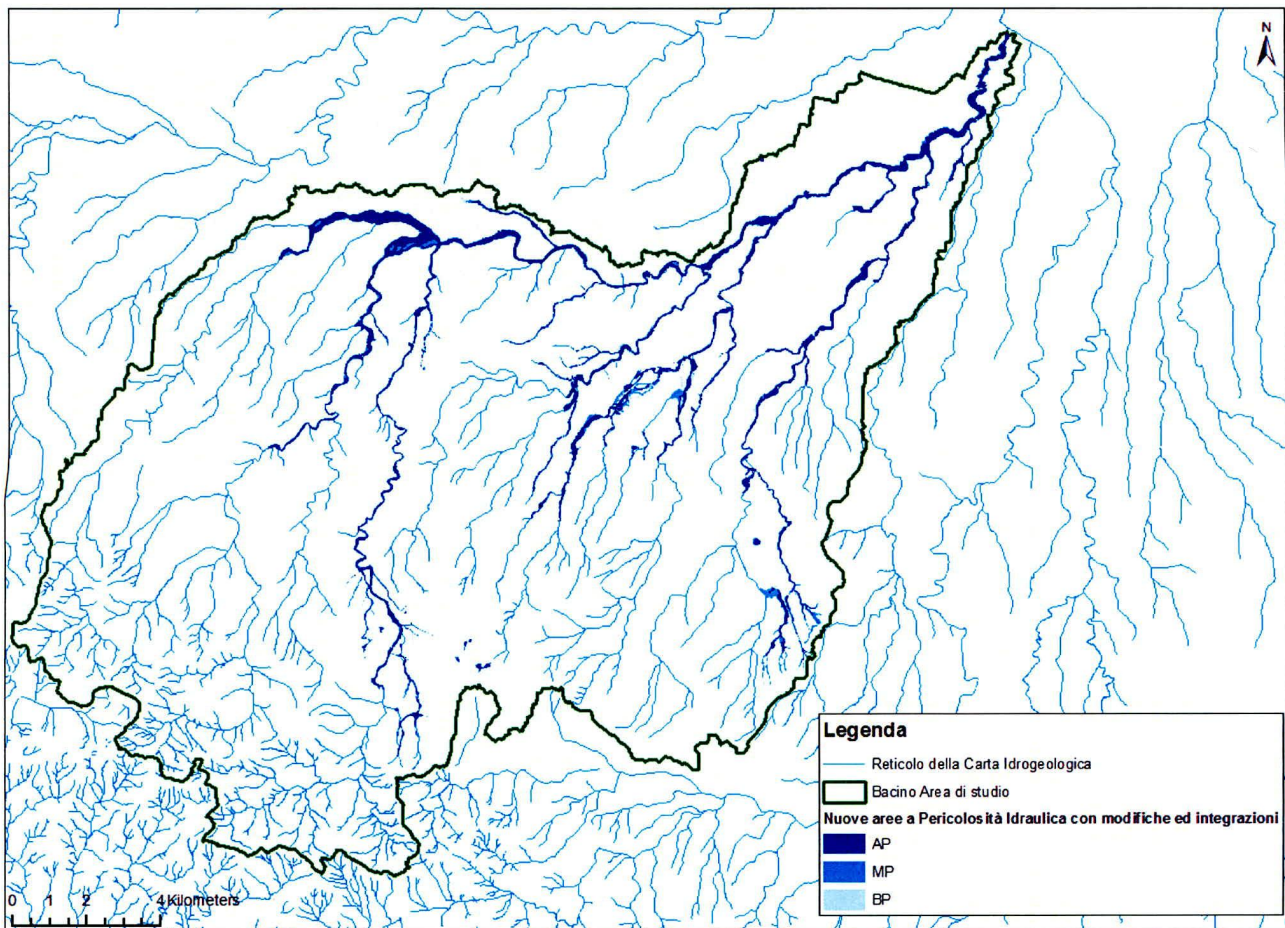


Figura 6.8 - Nuove aree a diversa pericolosità idraulica risultanti dallo studio presente con modifiche ed integrazioni

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

Ing. Rocco Bonelli

*Rocco Bonelli*

Ing. Maria Scarola

*Maria Scarola*



