REGIONE PUGLIA

Dipartimento Agricoltura, Sviluppo Rurale e Tutela dell'Ambiente

Sezione RISORSE IDRICHE

Servizio SISTEMA IRDICO INTEGRATO

POR PUGLIA 2014-2020 Asse VI - Azione 6.4.c (ex 6.4.3)

"Infrastrutture per il pretrattamento, stoccaggio e riutilizzo delle acque reflue depurate"

COMUNE DI PALAGIANO

Riutilizzo ai fini irrigui delle acque reflue affinate licenziate di depuratori a servizio degli abitati di Palagiano e Massafra

PROGETTO DEFINITIVO

OGGETTO: Relazione di compatibilità idrologica e idraulica.

R.U.P.
Ing. Silvia Micunco

Progettazione:
R.T.P. Ing. Giovanni LEUZZI
Ing. Roberto PISCONTI
Ing. Andrea DE GAETANI
Ing. Marco SPAGNOLO
Ing. Paolo GASPARRO

ELABORATO:

R03

Data:

Aprile 2021

Scala: /

Formato: A4

Revisione:

0



1 PREMESSA 2
2 INQUADRAMENTO territoriale 3
3 ANALISI morfologica 6
3.1 IL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO 6
3.2 IL RILIEVO LIDAR 6
3.3 CALCOLO DELLE DIREZIONI DI DEFLUSSO 7
3.4 INDIVIDUAZIONE DEI BACINI TRIBUTARI 8
4 ANALISI IDROLOGICA 10
4.1 ANALISI PLUVIOMETRICA 10
4.2 STIMA DELLE PORTATE AL COLMO DI PIENA 19
4.2.1 Metodologia CN-SCS 19
4.2.2 Determinazione della portata al colmo di piena: l'idrogramma di Mockus 23
4.2.3 Determinazione degli idrogrammi di piena 25
5 ANALISI Idraulica 36
5.1 TEORIA DEL MODELLO IDRAULICO 36
5.2 DESCRIZIONE DEL MODELLO COMPUTAZIONALE 37
6 conclusioni 39

ALLEGATI

1. Inquadramento Territoriale Cartografico su IGM
2. Pericolosità Idraulica Piano di Assetto Idrogeologico
3. Componenti Idrologiche Piano Paesaggistico Territoriale Regionale
4. Inquadramento Territoriale Cartografico su Carta Idrogeomorfologica AdB Puglia
5. Inquadramento Territoriale Cartografico su Ortofoto
6. Modello Digitale del Terreno SIT Puglia (celle 8 m x 8 m)
7. Modello Digitale del Terreno da Rilievo LIDAR del MATTM (celle 1 m x 1 m)
8. Bacini Idrografici
9. Curve Number
10. Analisi Idraulica Bidimensionale per Tr 200 anni
    1. Dettaglio Analisi Idraulica Bidimensionale per Tr 200 anni – INTERVENTO 1
    2. Dettaglio Analisi Idraulica Bidimensionale per Tr 200 anni – INTERVENTO 2
    3. Dettaglio Analisi Idraulica Bidimensionale per Tr 200 anni – INTERVENTO 3

1 PREMESSA

Il presente studio ha riguardato la verifica della compatibilità idraulica con le NTA del PAI Puglia del progetto per il Riutilizzo ai fini irrigui delle acque reflue affinate licenziate dai depuratori a servizio degli abitati di Palagiano e Massafra.
In particolare, verifica la sussistenza delle condizioni di sicurezza idraulica del posizionamento delle tubazioni interrate previste, in funzione del reticolo idrografico superficiale ufficiale, così come mostrato nella cartografia ufficiale I.G.M. in scala 1:25.000, ai sensi delle NTA del PAI redatte dall'AdB Puglia, come da ultimo aggiornate dalla D.G.R. 1675 DEL 08/10/2020.
Le analisi effettuate hanno consentito di stabilire le aree di allagamento attese in occorrenza di un evento meteorico con tempo di ritorno di 200 anni (valore a cui corrisponde la definizione di sicurezza idraulica come da art. 36 delle NTA del PAI). Pertanto si è partiti da uno studio a scala di bacino al fine di individuare prima le grandezze morfometriche da utilizzare come input nei modelli idrologici, poi valutare la curva di possibilità pluviometrica e conseguentemente gli idrogrammi di piena nelle sezioni di interesse.
Infine, è stata simulata la propagazione dell'onda di piena mediante un modello di calcolo idraulico a schema bidimensionale in condizioni di moto vario avendo come base altimetrica il modello tridimensionale dell'area di intervento.
Il seguente studio ha dato luogo allo sviluppo di più fasi che vengono nel seguito elencate:

- *Inquadramento territoriale e verifica dell'assoggettabilità alle NTA del PAI*. Si verifica se gli interventi ricadono all'interno delle fasce di modellamento attivo e di pertinenza fluviale (di cui agli artt. 6 e 10 delle NTA del PAI) o all'interno delle aree a diversa pericolosità idraulica di cui agli artt. 7, 8 e 9 delle NTA del PAI, come da ultimo aggiornate dalla D.G.R. 1675 DEL 08/10/2020.
- *Analisi geomorfologica:*
  - Acquisizione delle informazioni planoaltimetriche: si sono utilizzati i dati ufficiali a disposizione (CTR in scala 1:5.000, IGM 1:25.000), acquisizione del Modello Digitale del Terreno e del LIDAR dell'intero territorio;
  - Individuazione delle linee preferenziali di deflusso;
  - Determinazione dei bacini tributari e delle rispettive caratteristiche morfometriche.
  - Classificazione dei suoli e determinazione della loro capacità di infiltrazione.

- *Analisi idrologica*:
  - Analisi delle piogge, eseguita utilizzando le indicazioni riportate sul progetto Valutazione Piene (VAPI) del Gruppo Nazionali Difesa Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI);
  - Valutazione della durata dell'evento pluviometrico di progetto di durata pari al tempo che mette in crisi il bacino idrografico oggetto di studio (tempo di corrivazione e ietogramma di progetto);
  - Valutazione della pioggia efficace (pioggia netta) mediante l'applicazione del metodo del Curve Number;
  - Stima del picco di piena relativamente al prefissato tempo di ritorno eseguito utilizzando il metodo del Soil Conservation Service.

- *Modellazione idraulica:*
  - Modellazione idraulica bidimensionale in condizioni di moto vario relativa al tempo di ritorno di 200 anni per valutare l'estensione della piena di progetto, specificando le condizioni iniziali e al contorno utilizzate per l'implementazione del modello

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area di intervento ricade nel territorio del Comune di Palagiano (TA) a sud del centro abitato per quanto riguarda i tratti 1 e 3 dell'intervento in progetto, mente i tratti 2 ricade in agro del comune di Massafra, a sud del centro abitato.



Figura 1: Inquadramento su Ortofoto Regione Puglia

Nel presente studio, al fine di ottenere un'analisi territoriale quanto più dettagliata possibile, si è fatto riferimento ai seguenti dati cartografici disponibili:

- Cartografia IGM in scala 1:50.000;
- Cartografia IGM in scala 1:25.000;
- Carta Idrogeomorfologica AdB Puglia
- Ortofoto Regione Puglia;
- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:5.000.

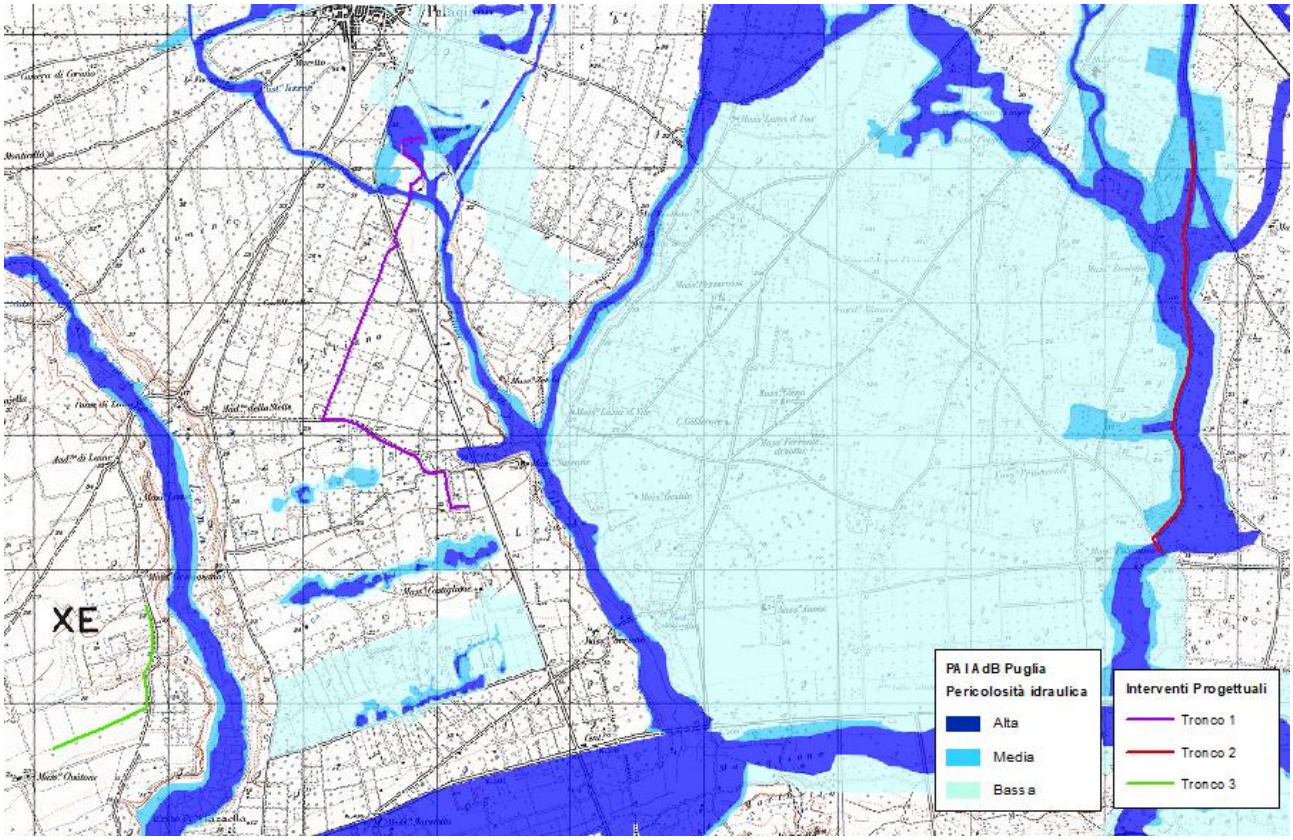


Figura 2: Inquadramento su IGM in scala 1:25.000 e PAI vigente

L'area di interesse, attraverso l'analisi delle ultime perimetrazioni del PAI su cartografia ufficiale consultabile in maniera interattiva tramite il WebGIS dell'AdB Puglia sul sito http://www.adb.puglia.it, ricade in ciascuna delle tre zone classificate ad Alta, Media, Bassa Pericolosità Idraulica, come definita di cui agli artt. 7, 8 e 9 delle Norme Tecniche di Attuazione (Novembre 2005) del Piano d'Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino della Puglia.

Inoltre, dall'analisi della cartografia ufficiale I.G.M. 1.25.000, l'area in esame risulta essere interessata da aste di reticolo idrografico, pertanto l'ubicazione degli interventi di interesse deve essere verificata con le aree di tutela ai sensi degli artt. 6 e 10 delle NTA del PAI della Puglia, ossia con i buffers relativi all'alveo fluviale in modellamento attivo ed aree golenali (di ampiezza pari a 75 m dall'asse del reticolo) ed alla fascia di pertinenza fluviale (di ampiezza pari a 75 m dalla fine dell'area a modellamento attivo), come da ultimo aggiornati dalla D.G.R. del 08/10/2020.

Approfondendo l'analisi mediante la nuova Carta Idrogeomorfologica del territorio pugliese redatta dall'Autorità di Bacino della Puglia, si conferma la presenza di un reticolo idrografico superficiale con sviluppo nei pressi dell'area di interesse.

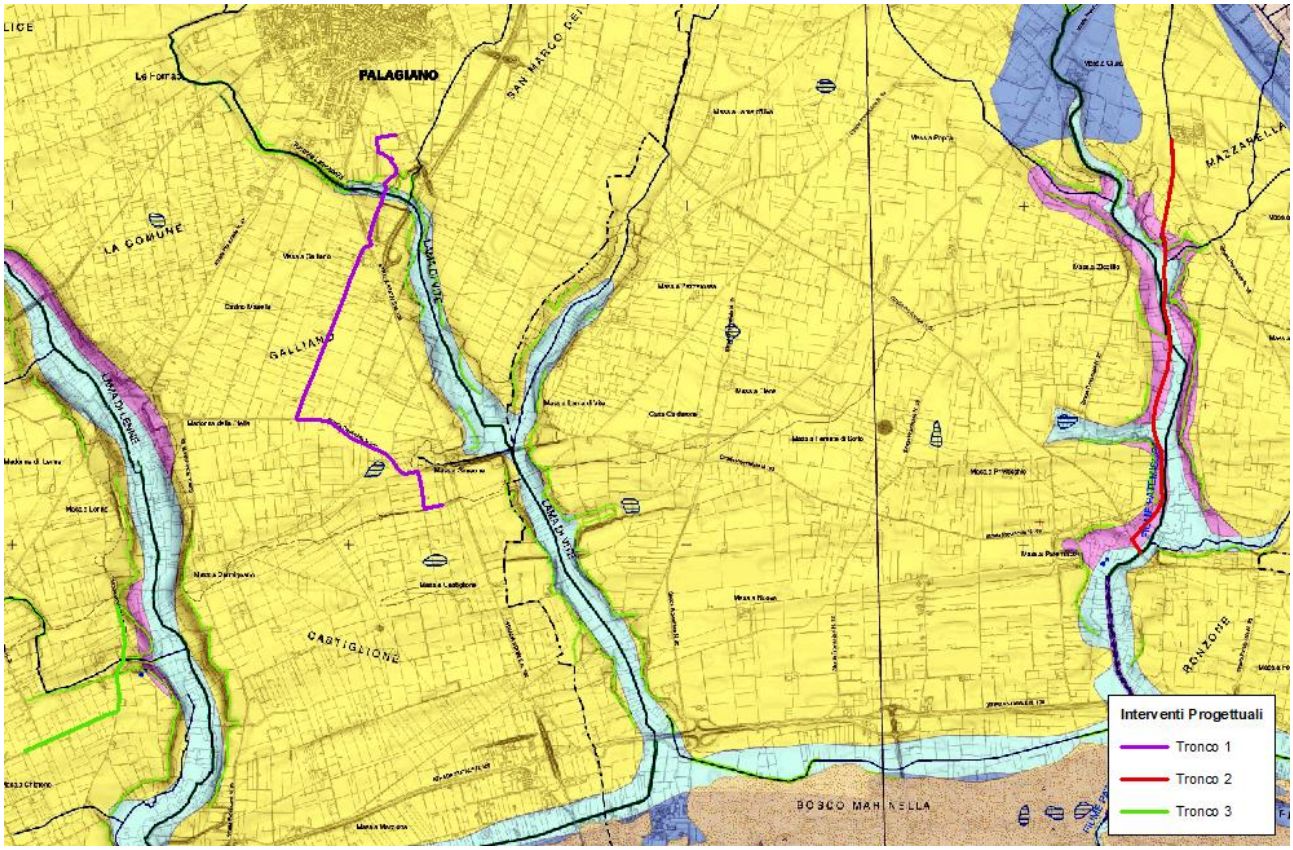


Figura 3: Inquadramento su Carta Idrogeomorfologica AdB Puglia

Tali considerazioni rendono necessaria una verifica della compatibilità idrologica-idraulica delle opere da realizzare, ai sensi delle NTA del PAI vigente, in modo da valutare, in particolare nelle aree interessate dall'ubicazione delle suddette opere, la sussistenza delle condizioni di sicurezza idraulica.

3 ANALISI MORFOLOGICA

L'approccio utilizzato per affrontare e risolvere le problematiche oggetto del presente studio parte da un'analisi a scala di bacino dei processi idrologici ed idraulici determinati dagli eventi meteorici estremi i cui effetti al suolo sono fortemente influenzati dallo stato dei luoghi, sia per l'aspetto della geomorfologia degli stessi sia dal punto di vista della loro destinazione d'uso.

Al fine di giungere a determinazioni che abbiano un riscontro attendibile rispetto alla realtà dei luoghi, è evidentemente necessario ricostruire, nella maniera quanto più dettagliata possibile, la conformazione degli stessi.

3.1 IL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO

La base dati principale sulla quale è basata l'analisi morfologica è rappresentata dal modello tridimensionale del terreno. 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.

Con il termine di modello digitale del terreno (in inglese "digital terrain model", DTM) si intende una superficie analitica continua o con discontinuità di prima specie ed in genere con derivata prima discontinua, in grado di rappresentare l'andamento spaziale di determinate caratteristiche territoriali.

Nel caso di sole superfici topografiche si parla di modelli digitali di quota ("digital elevation model", DEM). Il termine "digitale" ricopre una notevole importanza nella definizione dei DTMs e dei DEMs: indica che tali tipologie di dati sono disponibili su supporto informatico, quindi analizzabili da sistemi computerizzati.

In definitiva il Modello Digitale del Terreno (DEM) è una rappresentazione tridimensionale georeferenziata della regione oggetto di studio.

I DEM possono essere di tipo Grid o di tipo TIN (Triangulated Irregular Network). I DEM sotto forma di Grid, grazie alla distribuzione uniforme di informazioni e alla possibilità che essi danno di trattare i dati direttamente in forma matriciale, sono preferibili rispetto ai TIN.

Le celle sono posizionate nello spazio in base all'andamento della superficie topografica, e contengono un valore che descrive le caratteristiche del territorio secondo tematismi scelti in base alle necessità di analisi. Tali valori costituiscono un vero e proprio database associato alle singole celle, permettendo di analizzare la variazione dei parametri in modo continuo lungo la superficie topografica.

I valori degli attributi delle celle di un grid possono essere quindi elaborati in modo matematico o statistico, o ancora raggruppati in classi di valori discreti, garantendo comunque in ogni elaborazione la corretta georeferenziazione dei valori.

Nel presente studio, dall'analisi del modello digitale del terreno, acquisito dal SIT della Regione Puglia con risoluzione a 8 m, è stato possibile determinare i bacini idrografici afferenti alle depressioni morfologiche di interesse e quindi di determinare le relative caratteristiche morfometriche di cui necessita l'elaborazione idrologica.

3.2 IL RILIEVO LIDAR

La simulazione idraulica è stata condotta partendo dai dati ufficiali Li.D.A.R. con una risoluzione orizzontale di 1x1 m e verticale centimetrica (fonte MATTM).

Questi dati sono restituiti con una tecnica di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando un impulso laser. La distanza dell'oggetto è determinata misurando il tempo trascorso fra l'emissione dell'impulso e la ricezione del segnale retrodiffuso. La sorgente di un sistema Li.D.A.R. è un laser, ovvero un fascio coerente di luce ad una ben precisa lunghezza d'onda, che viene inviato verso il sistema da osservare.
I principali vantaggi del rilievo Li.D.A.R. sono: elevata qualità metrica del rilievo, alta densità di campionamento, possibilità di trascurare la vegetazione. Ciò che si ottiene con un rilievo Lidar è un insieme di punti ad ognuno dei quali è associato un dato relativo alle coordinate geografiche (sistema WGS 84), alla quota calcolata sulla base della differenza di tempo intercorsa tra il segnale emesso e quello riflesso ed il valore dell'intensità di segnale riflessa.
Dalla nuvola di punti totali si ottiene un Modello Digitale di Superficie, mentre per elaborazioni successive, che comprendono sia un filtraggio automatico che manuale, si estraggono i soli punti che appartengono al suolo da cui si ottiene un Modello Digitale del Terreno come quello utilizzato in questa sede.

3.3 CALCOLO DELLE DIREZIONI DI DEFLUSSO

La prima analisi da effettuare quando si vuol determinare il funzionamento idrologico di un bacino è il calcolo delle direzioni di deflusso. Le direzioni di deflusso possono essere definite come quelle direzioni secondo cui si orienta il deflusso in base all'andamento topografico dei luoghi.
Per la loro determinazione con i moderni sistemi GIS è necessario utilizzare come input la griglia di un DEM che è costituita da una griglia di dati matriciale in cui il valore della quota è rappresentativo di ogni cella.
Con l'ausilio delle moderne tecnologie è possibile affrontare svariate analisi e applicare diversi modelli di calcolo per la determinazione delle direzioni preferenziali di deflusso. La maggior parte dei software più diffusi in commercio utilizzano un algoritmo denominato D8 per la determinazione delle direzioni di deflusso. Detto algoritmo utilizza il più semplice metodo per la determinazione delle direzioni di flusso assegnandole partendo da ogni pixel verso uno dei suoi otto pixel adiacenti, o diagonali, nella direzione di massima pendenza. Questo metodo trova limitazione nel fatto che si ha la possibilità di assegnare i flussi solamente lungo otto direzioni formanti angoli di 45° fra loro.

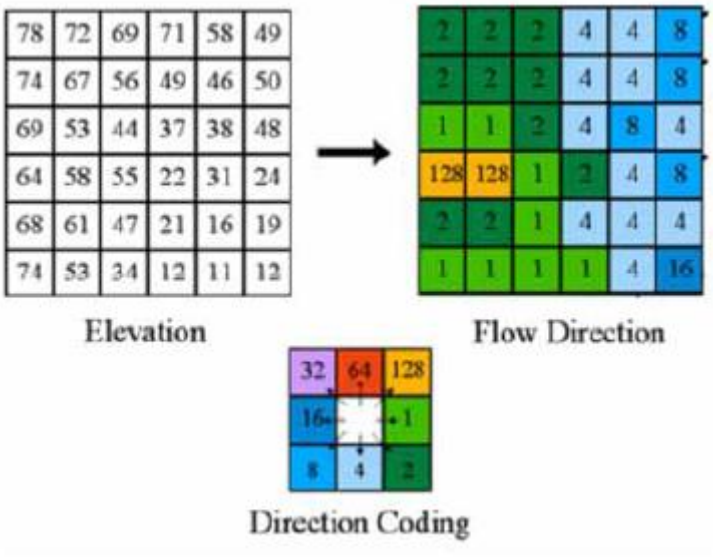


Figura 4: Flow direction (direzioni di flusso)

Determinate le direzioni preferenziali di deflusso, sempre attraverso l'ausilio di algoritmi di calcolo implementati nei normali software Gis, è stato possibile determinare l'area contribuente ad ogni cella del grid utilizzato adoperando la funzione di flow accumulation.
La funzione di flow accumulation calcola, per ogni cella, il numero di celle contribuenti a se stessa.
Risulta la ovvia conseguenza che la conoscenza della dimensione delle celle consente di determinare l'area contribuente ad ogni cella del grid.

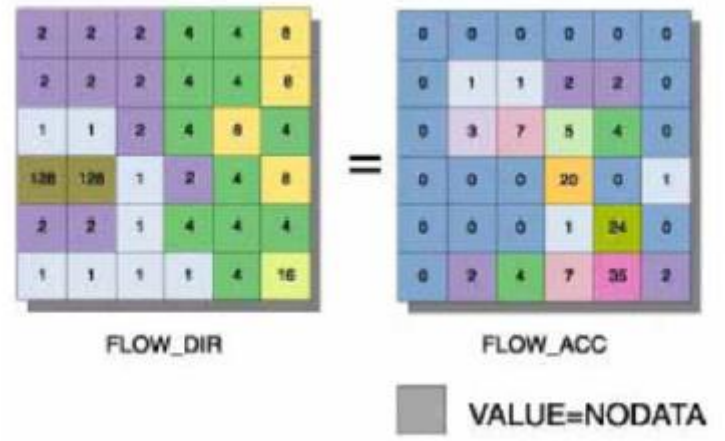


Figura 5: Flow accumulation

Grazie alla generazione della griglia di accumulo è possibile successivamente stabilire un numero minimo di celle tributarie e definire in questo modo la linea di compluvio naturale.

3.4 INDIVIDUAZIONE DEI BACINI TRIBUTARI

Dall'analisi del modello digitale del terreno, determinato attraverso l'applicazione di software di elaborazione tipo GIS così come descritto in precedenza, è stato possibile determinare i bacini idrografici afferenti alle sezioni di chiusura tirate in corrispondenza delle aree di interesse per il presente studio e determinare le caratteristiche morfometriche di cui necessita l'elaborazione idrologica.

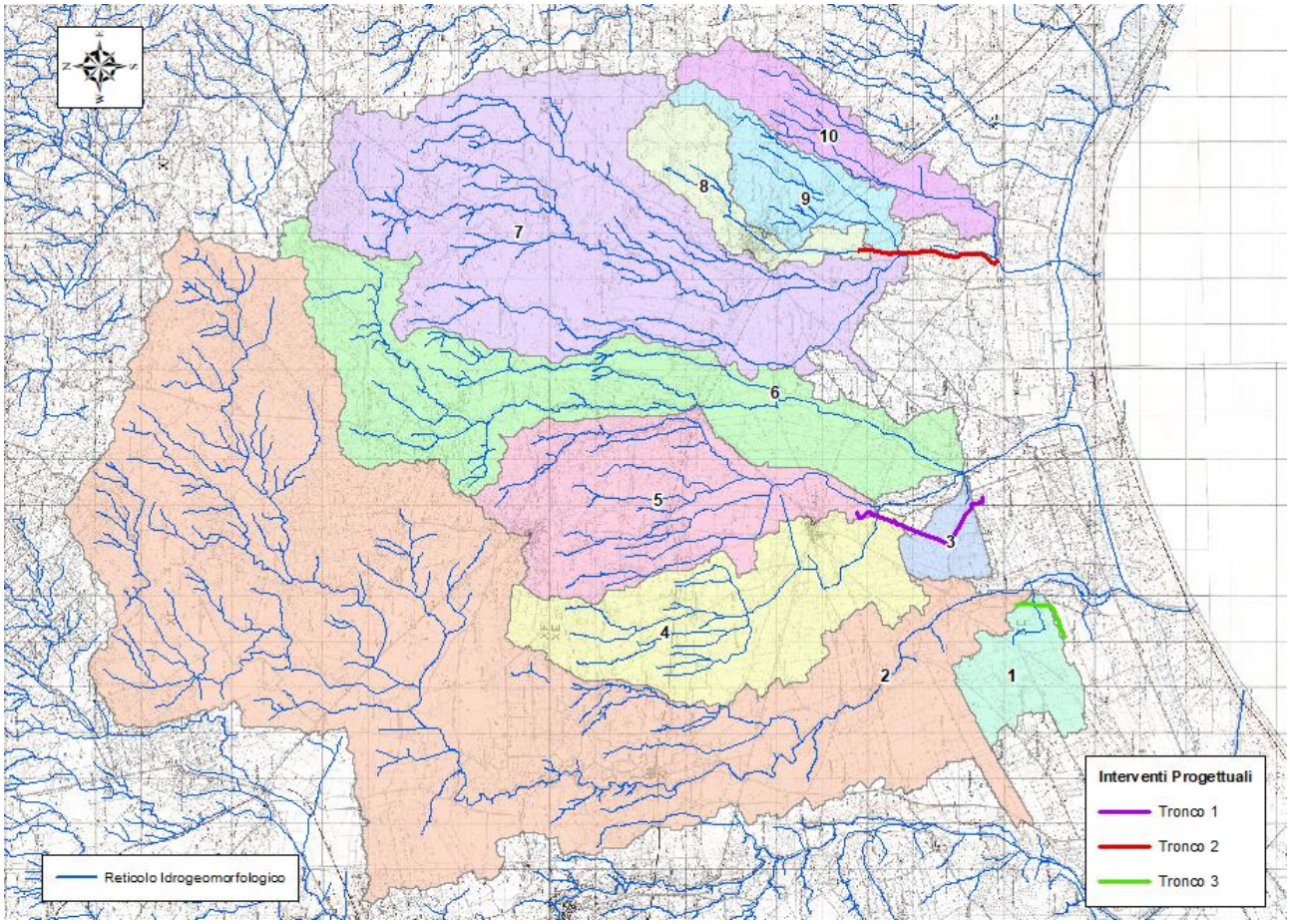


Figura 6: Bacini idrografici oggetti di studio

Bacino	Superficie (km^2)	Quota media (m)	Pendenza (%)	Lunghezza asta (km)
1	5.64	30.43	1.78	5.603
2	119.39	263.36	5.40	38.167
3	2.67	30.30	1.48	4.195
4	21.48	95.02	4.61	12.189
5	21.77	148.94	9.00	12.709
6	32.18	218.39	7.77	21.447
7	50.24	243.41	9.10	18.399
8	6.29	154.70	8.45	8.670
9	7.26	100.28	7.35	7.240
10	8.44	107.08	5.69	11.342

Tabella 1: Parametri morfometrici dei bacini idrografici

I bacini determinati e le loro caratteristiche morfometriche costituiscono l'input per l'applicazione dei modelli di calcolo afflussi-deflussi che verranno descritti nei paragrafi successivi.
L'analisi idraulica relativa ai bacini in questione sarà effettuata con un modello a parametri concentrati, ossia adottando come dato di input gli idrogrammi di piena per un tempo di ritorno di 200 anni, determinati con le metodologie di letteratura (metodo SCS CNIII), posizionati sul reticolo idrografico.

4 ANALISI IDROLOGICA

L'analisi idrologica ha come obbiettivo la valutazione delle portate di piena che, per prefissati tempi di ritorno, interessano un bacino idrografico e, di conseguenza, le sue infrastrutture, centri abitati, elementi vulnerabili.
Essa risulta di importanza fondamentale per il prosieguo dello studio in quanto consente di determinare le portate di ingresso nella sezione di chiusura, che verranno indicate più avanti, da utilizzare come input nel modello di calcolo idraulico.
Per l'analisi idrologica, così come riportato nella normativa vigente sulla difesa del suolo, è possibile far riferimento allo studio sulla Valutazione delle Piene (VAPI) che riguarda la Puglia, effettuato dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del CNR, conformemente al DPCM del 29/09/1998 e alla Relazione di Piano allegata al PAI approvato con delibera n.39 del 30/11/2005.
Nel VAPI l'analisi idrologica è basata sulla legge di distribuzione statistica TCEV (Rossi et al. 1984); la peculiarità di questo modello è quella di riuscire a considerare anche gli estremi idrologici, che sono di fatto gli eventi che inducono un livello di pericolosità più elevato, riconducendosi al prodotto di due funzioni di distribuzione di probabilità tipo Gumbel, una che riproduce l'andamento degli eventi ordinari e l'altra che riproduce l'andamento degli eventi eccezionali.
L'analisi idrologica effettuata viene affrontata effettuando le seguenti valutazioni:

- Analisi pluviometrica con determinazione delle curve di possibilità climatica in funzione del tempo di ritorno considerato;
- Applicazione dei modelli afflussi-deflussi per la determinazione degli idrogrammi di piena da inserire nei modelli idraulici.

4.1 ANALISI PLUVIOMETRICA

Al fine di stabilire gli idrogrammi di piena da utilizzare come input nei modelli di calcolo idraulici è necessario in prima battuta stabilire gli ietogrammi di pioggia che consentiranno di applicare i modelli afflussi- deflussi per la determinazione delle portate di piena. Per questo motivo è necessario effettuare un'analisi statistica degli eventi piovosi verificatisi in passato che, attraverso l'analisi di un campione significativo di dati storici, di determinare le Curve di Possibilità Pluviometrica (CPP) dalle quali si determina lo ietogramma di pioggia.
Per far fronte alle indicazioni dell'Autorità di Bacino della Puglia, in linea tra l'altro con la normativa nazionale, in questo studio viene applicata la metodologia di analisi riportata nel VAPI Puglia, fondata sulla funzione di distribuzione di probabilità (fdp) TCEV che verrà brevemente descritta nel seguito.
La TCEV ha la caratteristica di conferire al modello idrologico maggiore flessibilità e capacità di adattamento alle serie di dati disponibili, tuttavia occorre disporre di una serie storica di dati sufficientemente lunga per non incorrere in errori di campionatura. Per ovviare a questo problema il GNDCI ha messo a punto una procedura di regionalizzazione (Beran et al. 1986) che ha permesso di determinare i parametri della TCEV su tutto il territorio pugliese estendendo, in questo modo, la lunghezza delle serie storiche.
In Puglia la procedura di regionalizzazione ha individuato 6 zone omogenee la cui individuazione è rappresentata nella figura seguente.

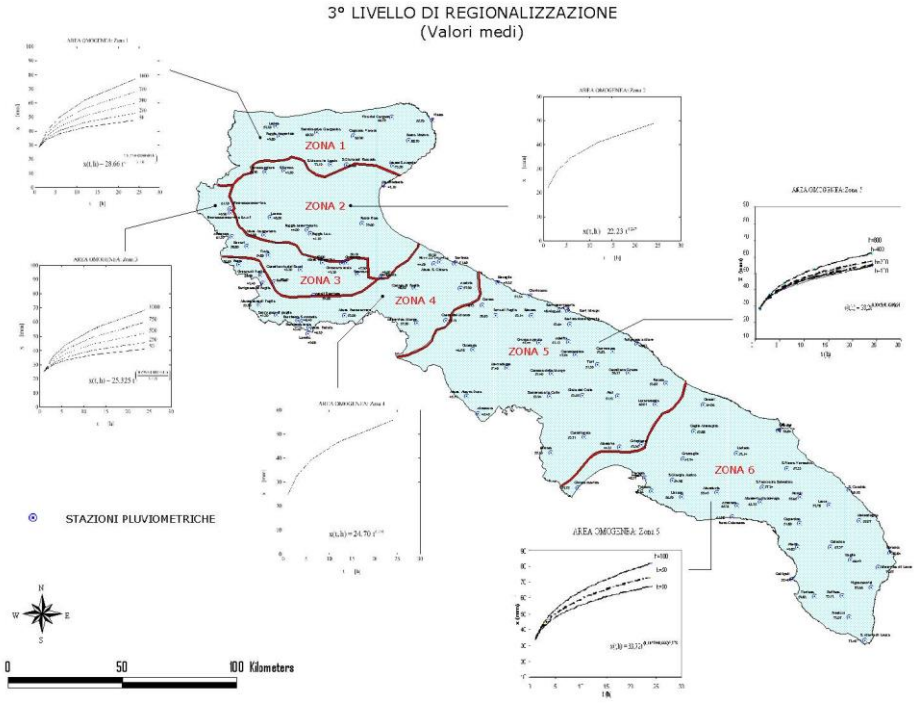


Figura 7: Zone omogenee della Puglia

Le relazioni che regolano le sei zone sono le seguenti:

Zona 1: $X(t,z) = 28.66\ t^{(0.000503z+0.720/3.178)}$

Zona 2: $X(t,z) = 22.23\ t^{0.247}$

Zona 3: $X(t,z) = 25.325\ t^{(0.696+0.000531z)/3.178}$

Zona 4: $X(t,z) = 24.70\ t^{0.256}$

Zona 5: $X(t,z) = 28.2\ t^{(0.628+0.0002z)/3.178}$

Zona 6: $X(t,z) = 33.7\ t^{(0.488+0.0022z)/3.178}$

dove:

t = durata della precipitazione;

z = quota media del sito.

In particolare, i bacini analizzati ricadono nella **zona omogenea 5**.

Pertanto, conformemente al DPCM 29/09/98 ed a quanto previsto dalla relazione di Piano del PAI, si è provveduto a calcolare le CPP mediante l'applicazione della metodologia VaPi (Valutazione Piene); tale nota applicazione si basa, come detto, sulla regionalizzazione dei dati pluviometrici attraverso una FDP di tipo TCEV (two components estreme value).

Per i massimi annuali delle precipitazioni giornaliere, è stato quindi adottato il modello di regionalizzazione basato sull'uso della distribuzione di probabilità TCEV (legge di distribuzione di probabilità del Valore Estremo a Doppia Componente), che rappresenta la distribuzione del massimo valore conseguito, in un dato

intervallo temporale, da una variabile casuale distribuita secondo la miscela di due leggi esponenziali, nell'ipotesi che il numero di occorrenze di questa variabile segua la legge di Poisson (Rossi e Versace, 1982; Rossi et al 1984). Il modello proposto ammette che le due componenti, quella straordinaria e quella ordinaria, appartengano a popolazioni diverse, tuttavia interferiscono tra loro seguendo un processo poissoniano. Il processo individua una variabile X che rappresenta il massimo valore in una certa durata D, di una variabile casuale Y distribuita secondo la miscela di due esponenziali (Y1 e Y2) con funzione di probabilità cumulata (CDF):

$$FY(y) = [Y<y] = p(1-e^{-y/\Theta_1}) + (1-p)\,(1-e^{-y/\Theta_2}); \qquad Y>0 \qquad 0<p<1$$

dove gli indici 1 e 2 si riferiscono alla componente ordinaria e straordinaria e p indica la proporzione della prima componente nella miscela.

Il numero di occorrenze K, cioè il numero di superamenti della variabile Y, in una durata D, è distribuito secondo la legge di Poisson con parametri uguali a Λ_1 e Λ_2 tali che:

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_{2=} E\,[Kt]$$

in cui Λ rappresenta la funzione parametro del processo, espressa come la media dei superamenti. Ipotizzando che Y1 e Y2 siano distribuite esponenzialmente con valori medi:

$$\Theta_1 = E\,[Y_1] \qquad \Theta_2 = E[Y_2]$$

l'equazione diventa:

$$Fkt(k) = \exp\,[-\Lambda_1 \exp(-k/\Theta_1) - \Lambda_2 \exp(-k/\Theta_2)\,]$$

che definisce la distribuzione TCEV.

La probabilità p_2 che un certo valore della X provenga dalla componente straordinaria è espresso dalla relazione:

$$p_2 = -\Lambda_*/\Theta_*\ \Sigma\varphi\ (-1)^j/j!\ \Lambda_*\Gamma(j+1/\Theta_*)$$

nella quale Γ è la funzione speciale e:

$$\Theta_* = \Theta_2/\Theta_1, \qquad \Lambda_*= \Lambda_2/\Lambda_1^{1/\Theta^*}$$

Se si dispone di un campione x1,x2,….,xn della variabile X (massimo annuale delle Y) osservato in n anni, la stima dei parametri della distribuzione può essere effettuata utilizzando le serie dei massimi annuali applicando il metodo della massima verosimiglianza (ML).

L'identificazione dei parametri della distribuzione TCEV consente di costruire un modello regionale con struttura gerarchica, basata su tre livelli di regionalizzazione, grazie a cui è possibile individuare regioni in cui risulta costante il coefficiente di asimmetria (G), quindi risultano costanti i due parametri Θ_* e Λ_* ad esso legati (primo livello di regionalizzazione), e sottoregioni di queste, più limitate, in cui sia costante anche il coefficiente di variazione, e quindi il parametro Λ_1 che da esso dipende (secondo livello di regionalizzazione). Il terzo livello è poi finalizzato alla ricerca di eventuali relazioni esistenti, all'interno di più piccole aree, tra il parametro di posizione della distribuzione di probabilità della X e le caratteristiche morfologiche. In particolare si nota che, all'interno di dette aree, i valori medi dei massimi annuali delle precipitazioni di diversa durata sono o costanti o strettamente correlati alla quota del sito di rilevamento.

L'analisi condotta per l'intero territorio pugliese suggerisce la presenza di una unica zona omogenea di primo livello (cioè caratterizzate dalla costanza di Θ * e Λ *), comprensiva di tutte le stazioni della Puglia, e di due sottozone omogenee al secondo livello.

L'analisi regionale dei dati di precipitazione al primo e al secondo livello di regionalizzazione è finalizzata alla determinazione delle curve regionali di crescita della grandezza in esame. In particolare per utilizzare al meglio le caratteristiche di omogeneità spaziale dei parametri della legge TCEV (CV e G), è utile rappresentare

la legge F(Xt) della distribuzione di probabilità cumulata del massimo annuale di precipitazione di assegnata durata Xt come prodotto tra il suo valore medio $\mu(X_t)$ ed una quantità KT,t, detta fattore probabilistico di crescita, funzione del periodo di ritorno T e della durata t, definito dal rapporto:

$$K_{t,T} = X_{t,T}/\mu(X_t) \qquad (a)$$

La curva di distribuzione di probabilità del rapporto (a) corrisponde alla curva di crescita, che ha caratteristiche regionali, in quanto è unica nell'ambito della regione nella quale sono costanti i tre parametri della TCEV.
E' possibile rappresentare graficamente la funzione KT=KT(T) al variare del tempo di ritorno Tr; si riporta nel grafico successivo tale legge di variazione.

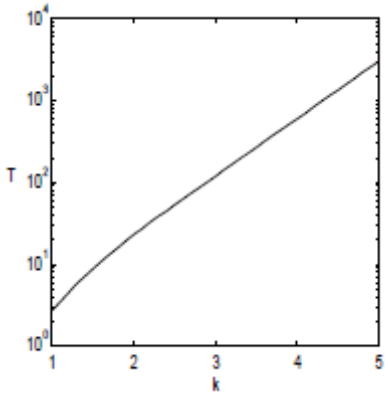


Grafico 1: Fattore di crescita al variare del tempo di ritorno

In alternativa alle rappresentazioni grafiche delle curve di crescita, il valore di KT può essere ricavato direttamente in funzione di Tr attraverso una approssimazione asintotica (Rossi e Villani, 1995) della legge di crescita. E' utile sottolineare che l'uso di questa approssimazione comporta una leggera sottostima del fattore di crescita, con valori che sono superiori al 5% solo per T<40 anni. La relazione è la seguente:

$$K_T = a + b \ln T \qquad (1)$$

in cui :

$$a = (\Theta_* \ln \Lambda_* + \ln \Lambda_1)/\eta$$

$$b = \Theta_*/\eta$$

$$\eta = \ln \Lambda_1 + C - To$$

To è una funzione il cui valore è stato ottenuto grazie a un programma di calcolo iterativo.
Pertanto nella tabella seguente sono riportati i valori dei parametri a e b, e i relativi valori η e To, che consentono di determinare nella forma (1) le leggi di crescita relative all'area in esame:

Zona omogenea	a	b	To	h
Puglia centro-meridionale	0.1599	0.5166	-0.6631	4.1053

Tabella 2: Coefficienti da utilizzare per l'uso dell'espressione asintotica

Va tuttavia osservato che l'uso di questa approssimazione comporta una sottostima del fattore di crescita, con valori superiori al 10% per T<50 anni e superiori al 5% per T<100 anni.
Per semplificare la valutazione del fattore di crescita, nella tabella seguente sono riportati i valori di K_T relativi ai valori del periodo di ritorno adottati nella determinazione delle aree soggette a rischio di inondazione.

anni	***30***	***200***	***500***
K_T	2	2.9	3.38

Tabella 3: Valori di K_T Puglia Centro-Meridionale

Le aree omogenee individuate al primo e secondo livello di regionalizzazione si parzializzano al terzo livello, nel quale si analizza la variabilità spaziale del parametro di posizione (media, moda, mediana) delle serie storiche in relazione a fattori locali.
Nell'analisi delle piogge orarie, in analogia ai risultati classici della statistica idrologica (Viparelli, 1964), per ciascuna stazione è stato possibile correlare il valore medio xt dei massimi annuali della precipitazione media di diversa durata t alle durate stesse, attraverso la relazione:

$$X_t = at^n \qquad (2)$$

essendo a ed n due parametri variabili da sito a sito. Ad essa si dà il nome di curva di probabilità pluviometrica.
Si riporta la relazione tra l'altezza media di precipitazione al variare della durata, in dipendenza con la quota del sito oggetto dello studio:

$$X_t = at^{(Ch+D+\log\alpha)/\log 24}$$

dove:
a è il valor medio, pesato sugli anni di funzionamento, dei valori di x1 relativi alle serie con N>=10 anni ricadenti nella zona omogenea;
α= xg/x24 è rapporto fra le medie delle piogge giornaliere e di durata t=24 ore per serie storiche relative ad uno stesso periodo di misura. Per la Puglia il valore del coefficiente α è risultato in pratica costante sull'intera regione e pari a 0.89.
C e D sono i coefficienti della regressione lineare fra il valore medio dei massimi annuali delle piogge giornaliere e la quota del sito di riferimento.
I valori delle stime dei parametri sono riportati nel prospetto seguente:

Zona	α	a	C	D	N
5	0,89	28,2	0,0002	0,628	-

Tabella 4: Valori delle stime dei parametri utilizzati nella relazione

L'area di interesse del presente studio si inquadra, nell'ambito dell'area pluviometrica omogenee individuata nel territorio regionale, in **zona 5**; pertanto l'equazione da applicare è la seguente:

$$X(t,z) = 28.2\, t^{(0.628+0.0002z)/3.178}$$

Tale equazione consente di valutare i valori delle altezze di pioggia medi della serie dei massimi considerata per questa zona per i differenti intervalli di precipitazione prescelti, in funzione del solo parametro della quota assoluta sul livello del mare di ciascuno dei bacini afferenti agli impluvi in esame.
Ai valori così ottenuti, vanno applicati coefficienti moltiplicativi relativamente al Fattore di Crescita K_T (funzione del tempo di ritorno dell'evento di progetto, espresso in anni), ed al Fattore di Riduzione Areale K_A (funzione della superficie del bacino espressa in kmq, e della durata dell'evento di progetto espressa in ore).
Determinando i valori di x per piogge di durata variabile da 1 a 24 ore è possibile costruire le curva di possibilità pluviometrica per il tempo di ritorno di 200.
Nel seguito si riporta il grafico relativo alla curva di probabilità pluviometrica, riferita al tempo di ritorno pari a 200 anni.

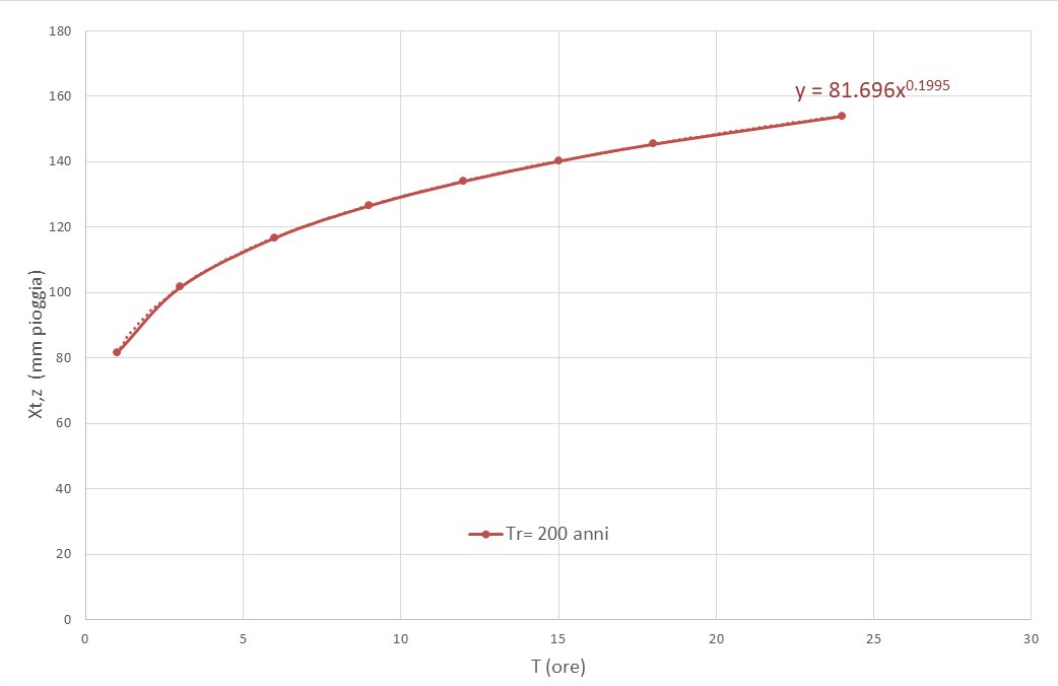


Grafico 2: Curva di Possibilità Pluviometrica per Tr 200 anni relativa ai Bacino 1 e Bacino 3

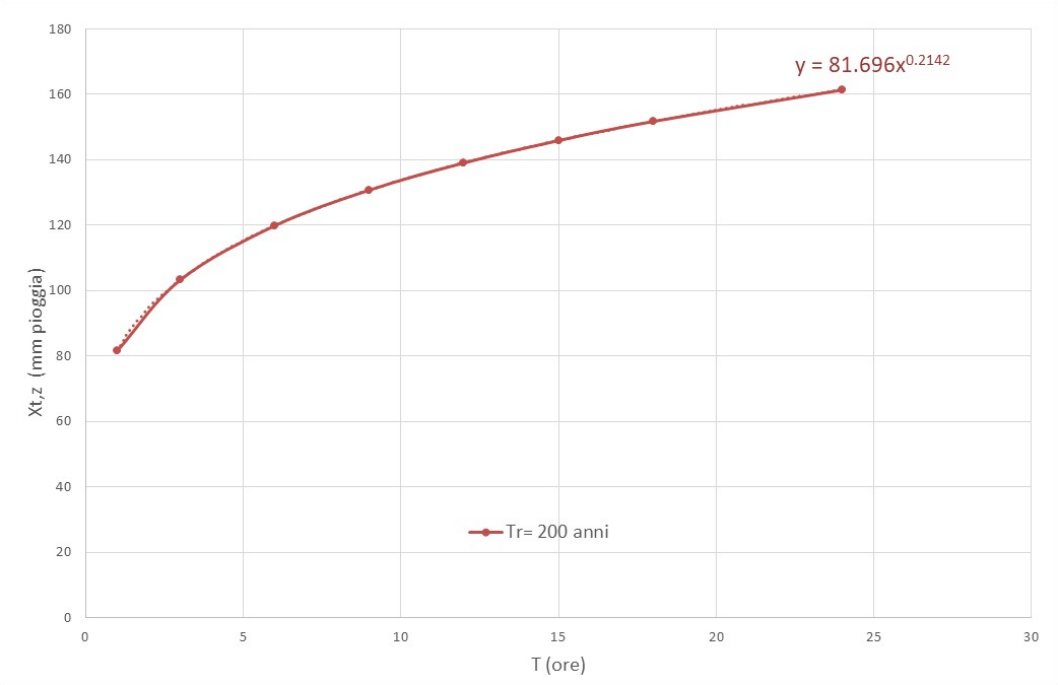


Grafico 3: Curva di Possibilità Pluviometrica per Tr 200 anni relativa al Bacino 2

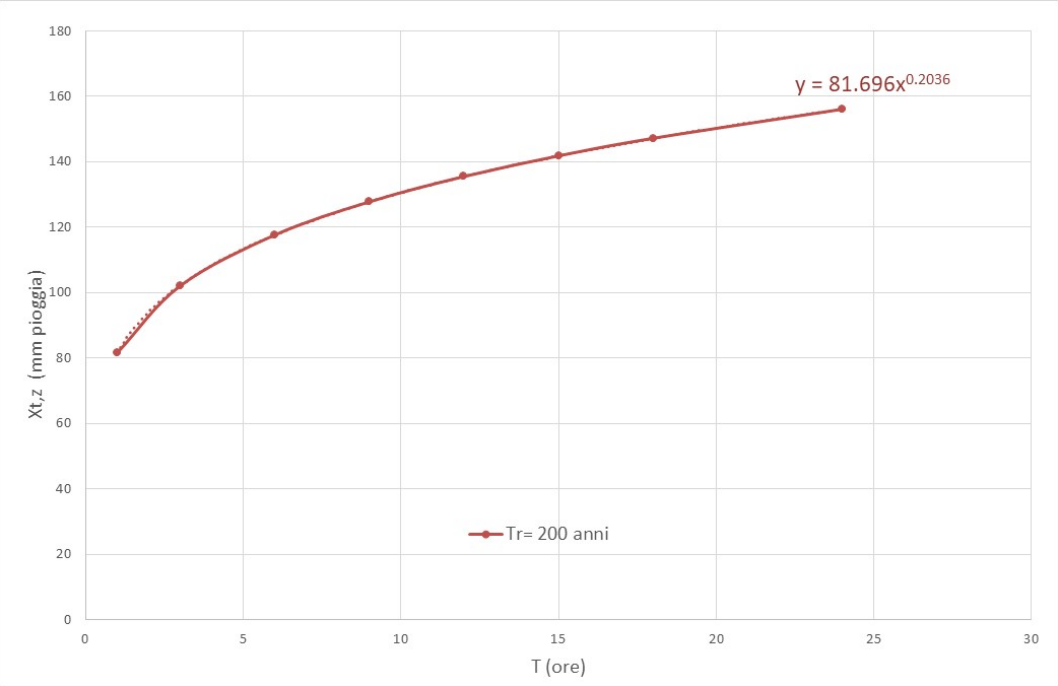


Grafico 4: Curva di Possibilità Pluviometrica per Tr 200 anni relativa al Bacino 4

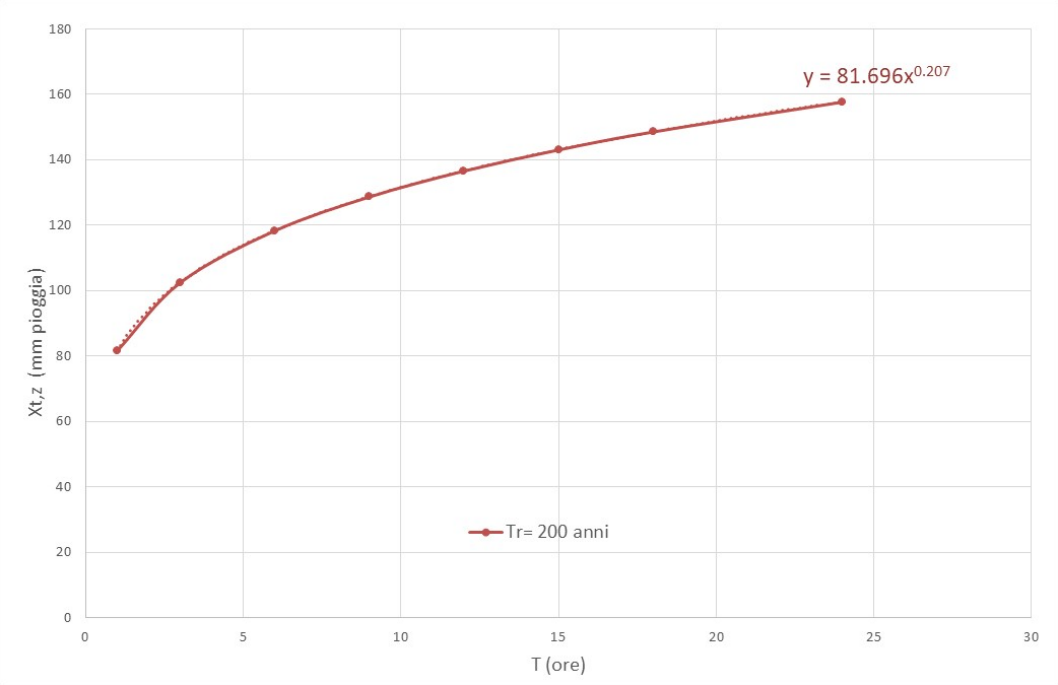


Grafico 5: Curva di Possibilità Pluviometrica per Tr 200 anni relativa al Bacino 5

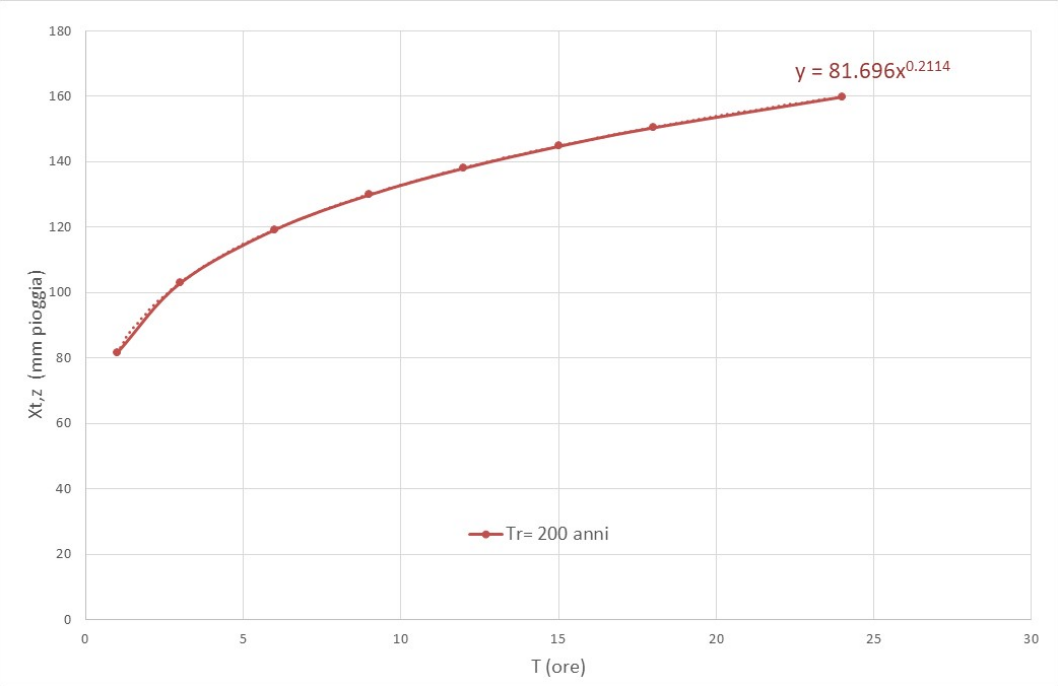


Grafico 6: Curva di Possibilità Pluviometrica per Tr 200 anni relativa al Bacino 6

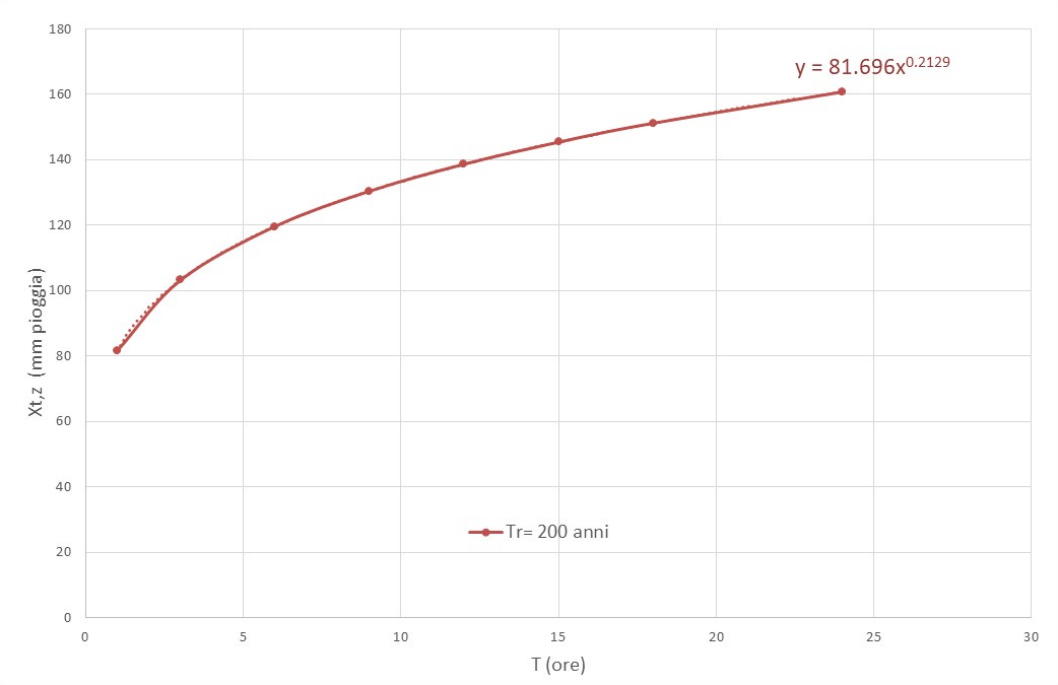


Grafico 7: Curva di Possibilità Pluviometrica per Tr 200 anni relativa al Bacino 7

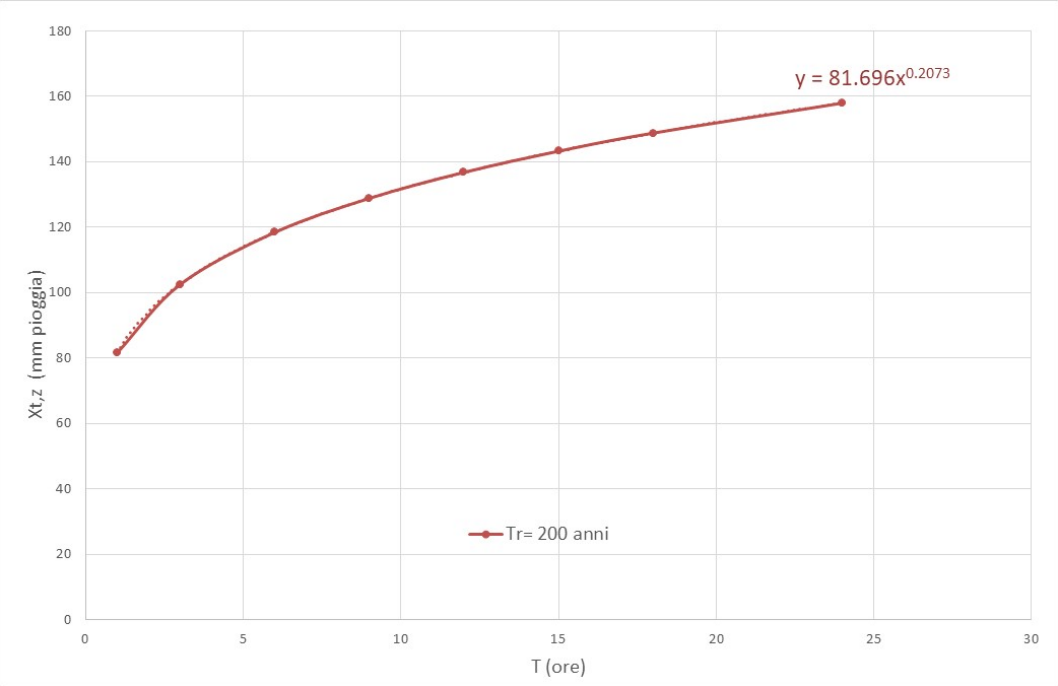


Grafico 8: Curva di Possibilità Pluviometrica per Tr 200 anni relativa al Bacino 8

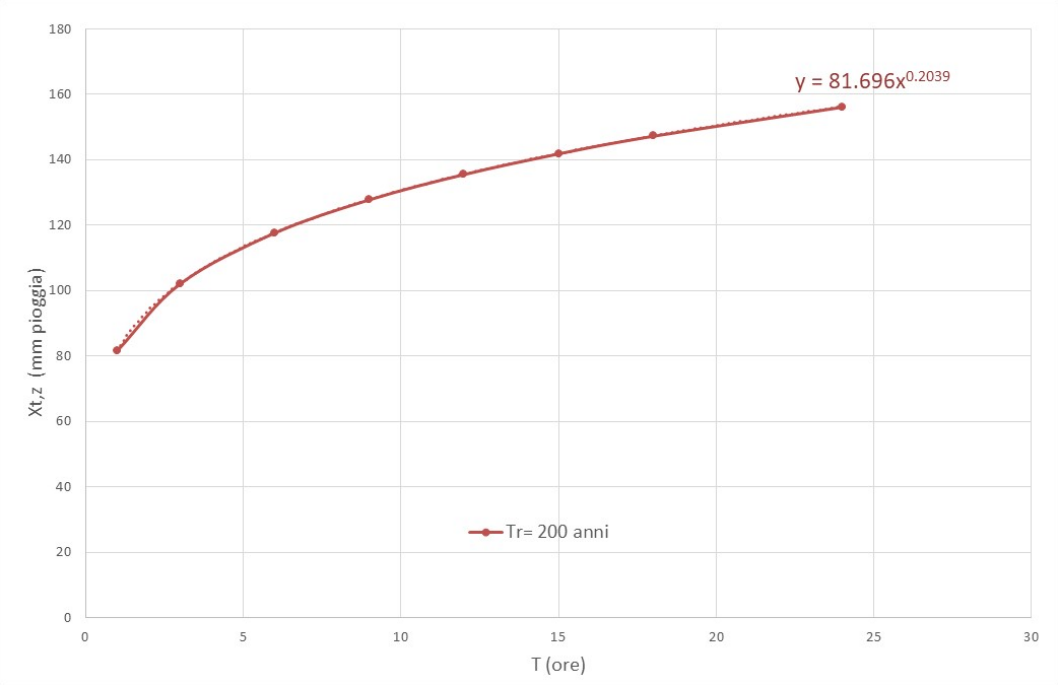


Grafico 9: Curva di Possibilità Pluviometrica per Tr 200 anni relativa al Bacino 9

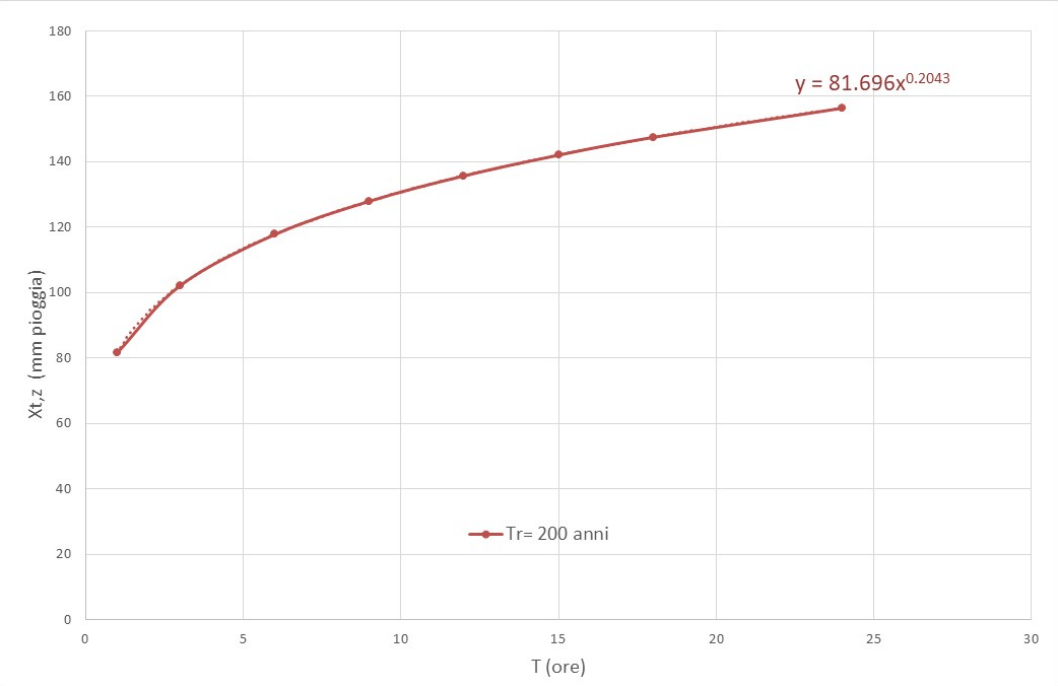


Grafico 10: Curva di Possibilità Pluviometrica per Tr 200 anni relativa al Bacino 10

4.2 STIMA DELLE PORTATE AL COLMO DI PIENA

La portata al colmo di piena corrisponde alla massima portata generata da una precipitazione di durata critica tale da mettere in crisi la rete idrografica e dipende fortemente dall'estensione del bacino. Questa circostanza è una logica conseguenza del fenomeno di trasferimento che impone che ogni particella liquida che cade in un punto del bacino deve seguire un suo percorso per giungere alla sezione di chiusura, impiegando, a parità di velocità di trasferimento, un tempo tanto maggiore quanto più lungo è il percorso da effettuare.
In particolare la valutazione delle portate al colmo di piena viene effettuata mediante il metodo SCS (Soil Conservation Service).

4.2.1 Metodologia CN-SCS

Il metodo SCS trova ormai larga diffusione nell'ambito delle applicazioni tecniche di questo tipo per qualunque tipologia di bacino ed è ampiamente diffuso anche in Italia. Il metodo consente sia la semplice valutazione del volume della piena, o della sua portata al colmo, sia la ricostruzione dell'idrogramma. La stima dell'idrogramma di piena generato da un bacino, a seguito di una determinata precipitazione caratteristica, avviene attraverso l'analisi geomorfologica e di uso del suolo del bacino; l'idrogramma di piena viene valutato attraverso la preventiva acquisizione di diversi parametri tra cui quelli elencati nel seguito:

- CN (Curve Number);
- S grado di saturazione del terreno;
- IA (Initial Abstraction), grado di assorbimento iniziale del terreno;
- AMC (Antecedent Moisture Condition), grado di imbibizione precedente l'evento;
- TL (Time Lag), tempo di ritardo tra il centro del pluviogramma e quello dell'idrogramma;
- RL (Reach Lag), tempo impiegato dall'onda di piena per il trasferimento attraverso l'asta.
- Durata precipitazione caratteristica.

La metodologia si basa sull'ipotesi che sia sempre valida la seguente relazione:

$$\frac{V}{P_n} = \frac{W}{S}$$

con:

- V = volume di deflusso;
- P_n = Pioggia netta;
- W = volume idrico realmente invasato nel suolo;
- S = volume massimo che il suolo può immagazzinare.

La pioggia netta si può determinare sottraendo alla precipitazione totale il parametro I_a che tiene conto dell'accumulo di volumi idrici in superficie, dell'infiltrazione iniziale e superficiale nel suolo e dell'intercettazione operata dalla copertura vegetale.
In linea generale il valore di Ia può essere assunto, come è stato fatto per il presente studio secondo le indicazioni dell'SCS, pari a:

$$I_a = 0.2S$$

Pertanto il volume di deflusso V può essere ricavato dalla seguente relazione:

$$V = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

La valutazione di S viene effettuata con l'ausilio della relazione seguente:

$$S = 25.4\left(\frac{1000}{CN} - 10\right)$$

Il parametro CN è denominato Curve Number esso indica l'attitudine del bacino a produrre deflusso e si stima sulla base delle caratteristiche idrologiche dei suoli e di copertura vegetale.
Il parametro "CN" individua, attraverso l'analisi geolitologica dei suoli del bacino, la capacità di risposta in termini di infiltrazione e ruscellamento a fronte di un evento di pioggia del bacino.
Tale indice ha un valore compreso tra 0 e 100 e, per la sua determinazione, il Soil Conservation Service propone delle classificazioni, in modo da far rientrare la zona esaminata in una determinata categoria e ricavare da opportune tabelle il valore di CN corrispondente.
Nella tabella seguente è riportata la classificazione dei terreni secondo l'S.C.S. che distingue quattro classi di suolo in base alla potenzialità di deflusso: da terreni altamente permeabili, con scarsa potenzialità di deflusso (classe A) a terreni impermeabili con alta potenzialità di deflusso (classe D).

CLASSE	TIPOLOGIA DI TERRENO
A	Scarsa potenzialità di deflusso: comprende strati profondi di sabbia con scarsissimo limo e argilla, strati profondi di limo calcareo, limi aggregati. Si ha un tasso d'infiltrazione elevato anche quando i terreni sono completamente bagnati.
B	Potenzialità di deflusso mediamente bassa: comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi di quelli appartenenti al gruppo A, strati sottili di limo calcareo, loam (mistura di sabbia, limo, argilla e humus).
C	Potenzialità di deflusso mediamente alta: comprende suoli sottili contenenti considerevoli quantità di argilla, loam argillosi, strati sottili di loam sabbiosi, terreni con ridotti contenuti organici.
D	Potenzialità di deflusso molto alta: comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, sabbie saline e suoli sottili con orizzonti impermeabili in vicinanza della superficie.

Tabella 5: Classificazione dei terreni secondo l'S.C.S.

Noti i gruppi idrologici per ogni classe litologica e quindi per ogni area a diversa categoria d'uso del suolo, per determinare il parametro CN, si fa riferimento alla seguente tabella, dove sono riportati i valori di CN per ciascuna classe d'uso del suolo e per ogni gruppo idrogeologico.

Tipo di copertura	A	B	C	D
Aree agricole con presenza di spazi naturali	62	71	78	81
Aree Urbane	98	98	98	98
Area residenziale	77	85	90	92
Cava	60	60	60	60
Distretti industriali	81	88	91	93
Bacini di acqua	100	100	100	100
Colture erbacee da pieno campo a ciclo primaverile estivo	72	81	88	91
Colture orticole a ciclo estivo-autunnale/primaverile	72	81	88	91
Colture orticole a ciclo primaverile-estivo	72	81	88	91
Colture temporanee associate a colture permanente	62	71	78	81
Frutteti e frutti minori non irrigui	62	71	78	81
Frutteti e frutti minori irrigui	72	81	88	91
Oliveti irrigui	72	81	88	91
Oliveti non irrigui	62	71	78	81
Prati stabili non irrigui	30	58	71	78
Seminativi in aree non irrigue	62	71	78	81
Sistemi colturali e particellari complessi	72	81	88	91
Vigneti irrigui	72	81	88	91
Vigneti non irrigui	62	71	78	81
Zone boscate	45	66	77	83

Tabella 6: Determinazione dei valori di Curve Number per le categorie di uso del suolo della CTR Puglia

Si calcola il CN come media pesata, considerando come pesi le percentuali areali di ciascuna classe d'uso del suolo. I valori ottenuti, desunti dalla carta di uso del suolo si riferiscono ad un grado di umidità iniziale del terreno prima che si verifichi l'evento meteorico di tipo II, cioè ad un terreno umido.

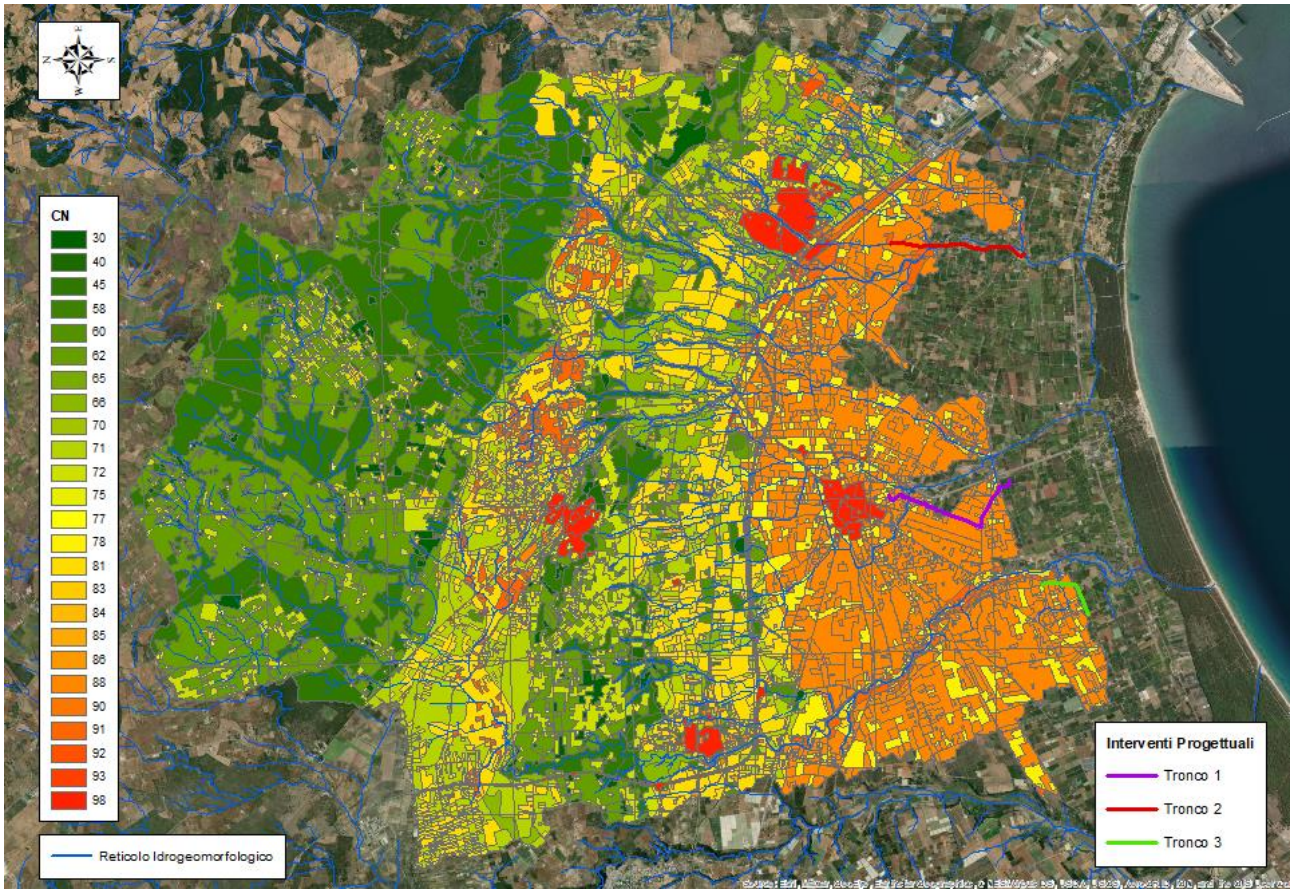


Figura 8: Mappa del Curve Number ottenuta a partire dall'uso del Suolo e dalla carta della Permeabilità

È possibile prendere in considerazione anche situazioni di umidità del terreno all'inizio della precipitazione diversa da quella media; il metodo, infatti, classifica le condizioni di umidità in tre categorie:

- AMC I: potenziale di scorrimento superficiale minimo; i suoli del bacino sono sufficientemente asciutti da permettere un'aratura o coltivazione soddisfacente;
- AMC II: condizione media;
- AMC III: potenziale di scorrimento superficiale massimo; il bacino è stato praticamente saturato dalle piogge precedenti.

La categoria a cui fare riferimento si può individuare in base alla precipitazione totale dei 5 giorni precedenti quello dell'evento di pioggia e in base alla stagione (vegetativa o non vegetativa), come riportato nella tabella seguente.

Classe AMC	**Precipitazioni nei dieci giorni precedenti (mm)**
I (Terreno secco)	0<P<50
II (Umidità media)	50<P<110
III (Terreno da mediamente umido a saturo)	P>110

Tabella 7: Categoria di umidità iniziale in funzione di precipitazioni pregresse

I valori di CN corrispondenti alle classi AMCI e AMCIII si determinano dal valore del CN relativo alla classe AMCII applicando le seguenti relazioni:

$$CN(I) = \frac{4{,}2\ CN(II)}{10 - 0{,}058\ CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23\ CN(II)}{10 + 0{,}13\ CN(II)}$$

Nel presente studio si è utilizzato il valore del coefficiente CN calcolato per condizioni di umidità **AMC III** per il tempo di ritorno di 200 anni, avendo considerato lo stato del suolo in condizioni critiche di saturazione e infiltrazione minima.
Nella seguente tabella sono riportati i risultati ottenuti per i bacini idrografici considerati.

Bacino	CNII	CNIII
1	86.37	94.81
2	66.85	82.31
3	87.51	95.47
4	79.42	90.66
5	75.23	88.00
6	69.99	84.50
7	65.58	81.40
8	73.04	86.56
9	79.27	90.56
10	77.15	89.23

Tabella 8: Valori di CNII e CNIII

4.2.2 Determinazione della portata al colmo di piena: l'idrogramma di Mockus

Per il calcolo della portata al colmo Q_p si considera un idrogramma approssimato di forma triangolare (Mockus) rappresentato nella figura seguente:

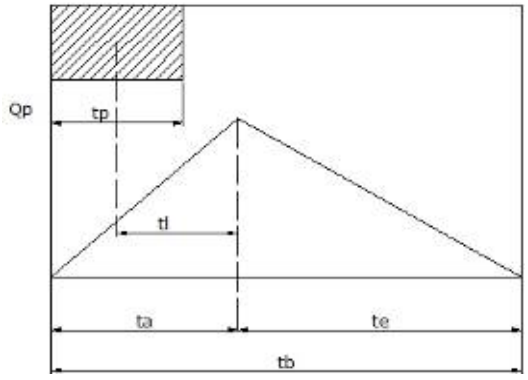


Grafico 11: Idrogramma di Mockus

che ha una fase crescente di durata t_a ed una fase di esaurimento di durata t_e e il cui volume, espresso in m^3, ha la seguente espressione:

$$\text{Vol} = \frac{Q_p}{2}(t_a + t_e) = \frac{Q_p t_b}{2}$$

avendo indicato con t_b la durata dell'evento di piena.

Poiché è stato stabilito sperimentalmente che nella fase crescente dell'idrogramma di piena defluisce un volume idrico pari al 35.7% del volume totale V di deflusso, è possibile stabilire la relazione che lega ta a tb dalla seguente:

$$0.375\,\frac{Q_p}{2}(t_b) = \frac{Q_p}{2}(t_a)$$

e cioè:

$$t_b = 2.67\,t_a$$

Sostituendo quest'ultima nella espressione che lega il volume a t_b (*), esprimendo il volume di deflusso V (porzione di precipitazione netta che defluisce dalla sezione di controllo) in millimetri, l'area del bacino in chilometri quadrati e il tempo ta in ore; si ottiene:

$$Q_p = 0.208\,\frac{VA}{t_a}\ [\mathrm{m}^3/s]$$

La determinazione di t_a, nell'ipotesi di precipitazione di intensità costante di durata t_p e indicando con t_L il tempo di ritardo (distanza tra il baricentro dello istogramma e il picco dell'idrogramma triangolare), si effettua con la semplice relazione:

$$t_a = 0{,}5t_p + t_L$$

Per la determinazione del tempo di ritardo, espresso in ore, si utilizza la **formula di Mockus**:

$$t_L = 0{,}342\,\frac{L^{0,8}}{s^{0,5}}\left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0,7}$$

in cui s è la pendenza del bacino espressa in %, L è la lunghezza dell'asta principale prolungata fino alla displuviale espressa in km e CN è il "curve number" medio del bacino.
Poiché la precipitazione critica per il bacino è quella avente una durata pari al tempo di corrivazione (t_c), la durata dell'evento meteorico di riferimento t_p viene imposta pari a t_c:

$$t_p = t_c$$

Il tempo di corrivazione è correlato al tempo di ritardo attraverso la seguente relazione:

$$\frac{t_L}{t_c} = 0{,}6$$

Le piogge critiche per tempo di ritorno duecentennale si individuano attraverso le curve di possibilità climatiche precedentemente definite, una volta calcolato il tempo di corrivazione del bacino idrografico in esame.

Bacino	t_c (ore)	hmax(mm)
1	3,29	103,61
2	15,76	147,48
3	2,74	99,93
4	4,80	112,45
5	4,03	109,00
6	7,62	125,61
7	7,00	123,64
8	3,26	104,35

9	2,52	98,63
10	4,37	110,43

Tabella 9: Altezze critiche di pioggia – Tr 200 anni

Si ricava, quindi, il valore della pioggia netta, dell'afflusso netto al bacino e della portata al colmo di piena attraverso l'applicazione del metodo Curve Number-SCS già descritto. Il valore del Curve Number usato è relativo a condizioni cautelative di umidità del bacino antecedenti l'evento, ovvero quelle relative al CN (III).

Bacino	$Q_{200}(m^3/s)$
1	28,74
2	139,72
3	15,94
4	72,88
5	77,91
6	66,21
7	100,13
8	24,99
9	39,63
10	29,44

Tabella 10: Portate al colmo di piena – Tr 200 anni

4.2.3 Determinazione degli idrogrammi di piena

Definite le portate al colmo di piena si è passati a definire la forma dell'idrogramma di piena. Gli idrogrammi di piena sono stati ricostruiti a partire dall'idrogramma adimensionale di Mockus, ossia una curva dimensionale ricavata da numerosi idrogrammi unitari ottenuti da idrogrammi di piena registrati in bacini di differente estensione e posizione geografica, che mette in relazione il rapporto tra la generica portata Q all'istante t e la portata al colmo Q_p che si verifica all'istante t_a (tempo di accumulo: durata della fase di crescita) con la variabile t/t_a. La determinazione degli idrogrammi di piena è consistita quindi nell'amplificare l'ascissa e l'ordinata dell'idrogramma unitario di Mockus mediante due fattori, rispettivamente pari a t_a e Q_p caratteristici del bacino analizzato.

t/t_a	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Q/Q_p	0,03	0,10	0,19	0,31	0,47	0,66	0,82	0,93
	0,99	1,00	0,99	0,93	0,86	0,78	0,68	0,56
t/t_a	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,5	5,0
Q/Q_p	0,46	0,39	0,33	0,28	0,207	0,147	0,107	0,077
	0,055	0,04	0,029	0,021	0,015	0,011	0,005	0,0

Tabella 11: Coordinate idrogramma unitario SCS adimensionalizzato di Mockus

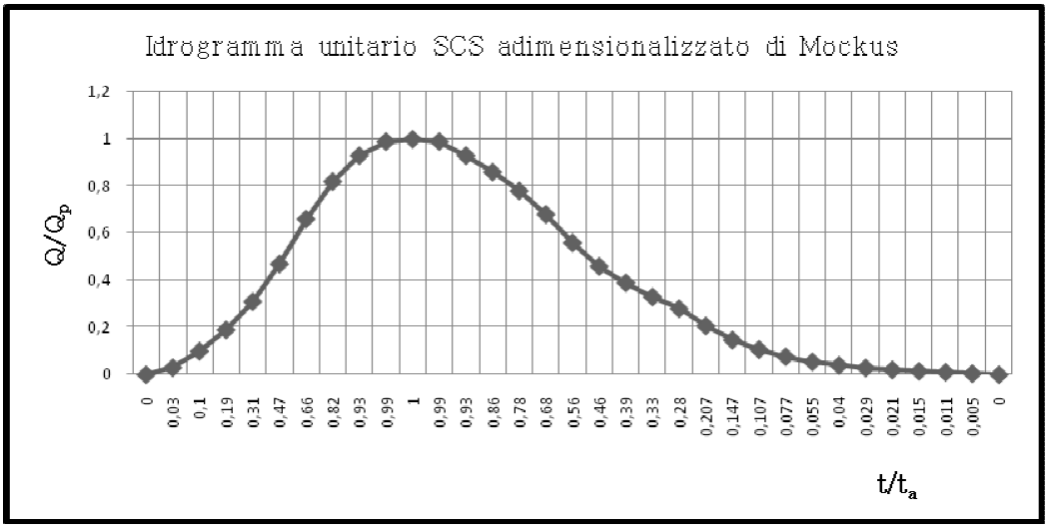


Grafico 12: Idrogramma unitario adimensionale di Mockus

L'applicazione della procedura precedentemente esposta ai bacini individuati ha condotto alla determinazione degli idrogrammi di piena per il tempo di ritorno di 200 anni, di seguito riportati.

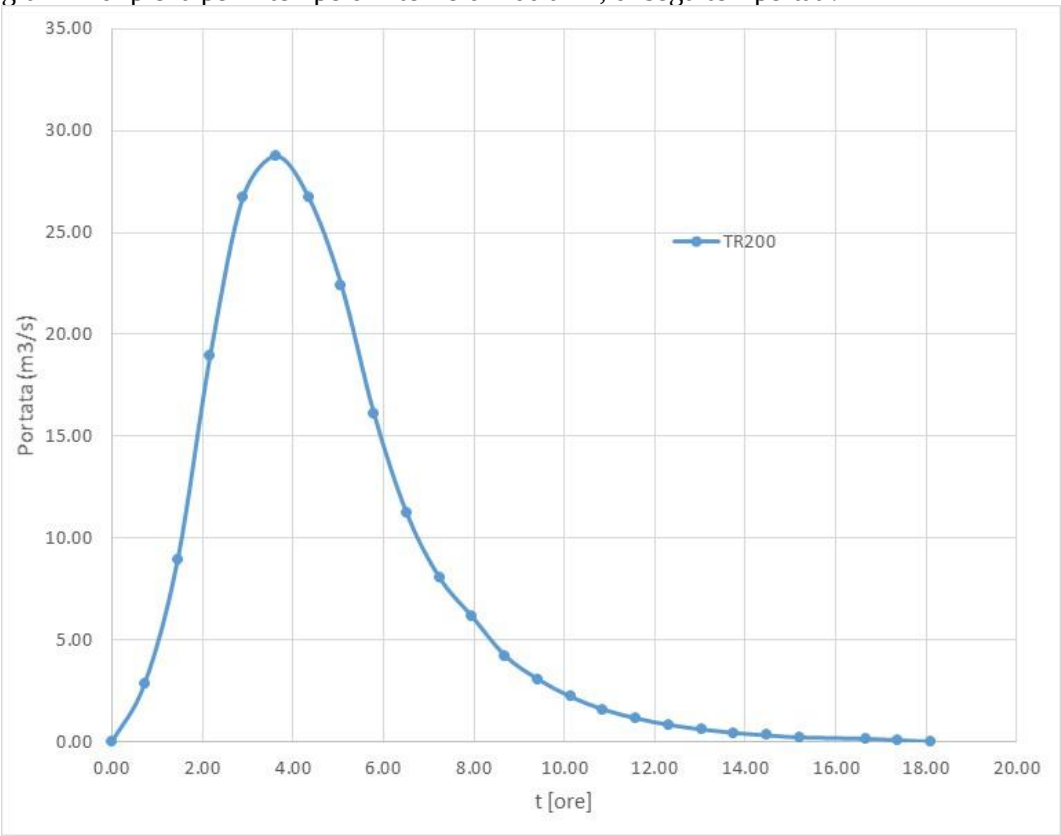


Grafico 13: Idrogramma di piena per il Bacino 1

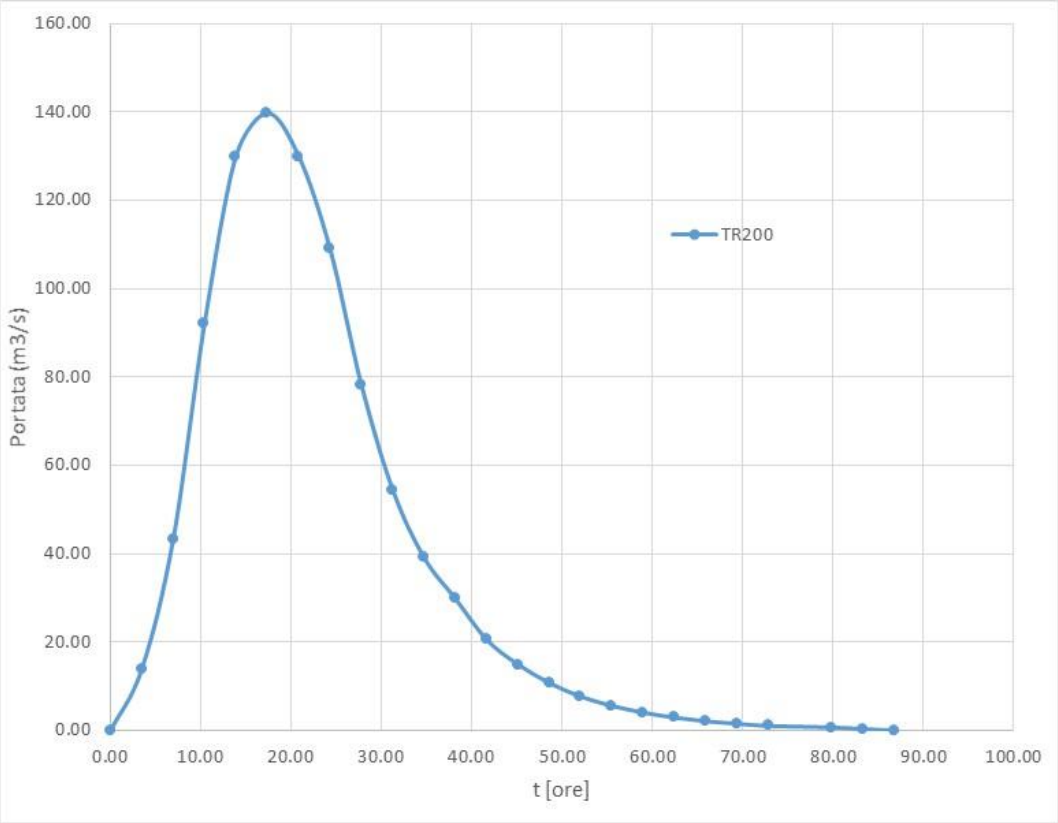


Grafico 14: Idrogramma di piena per il Bacino 2

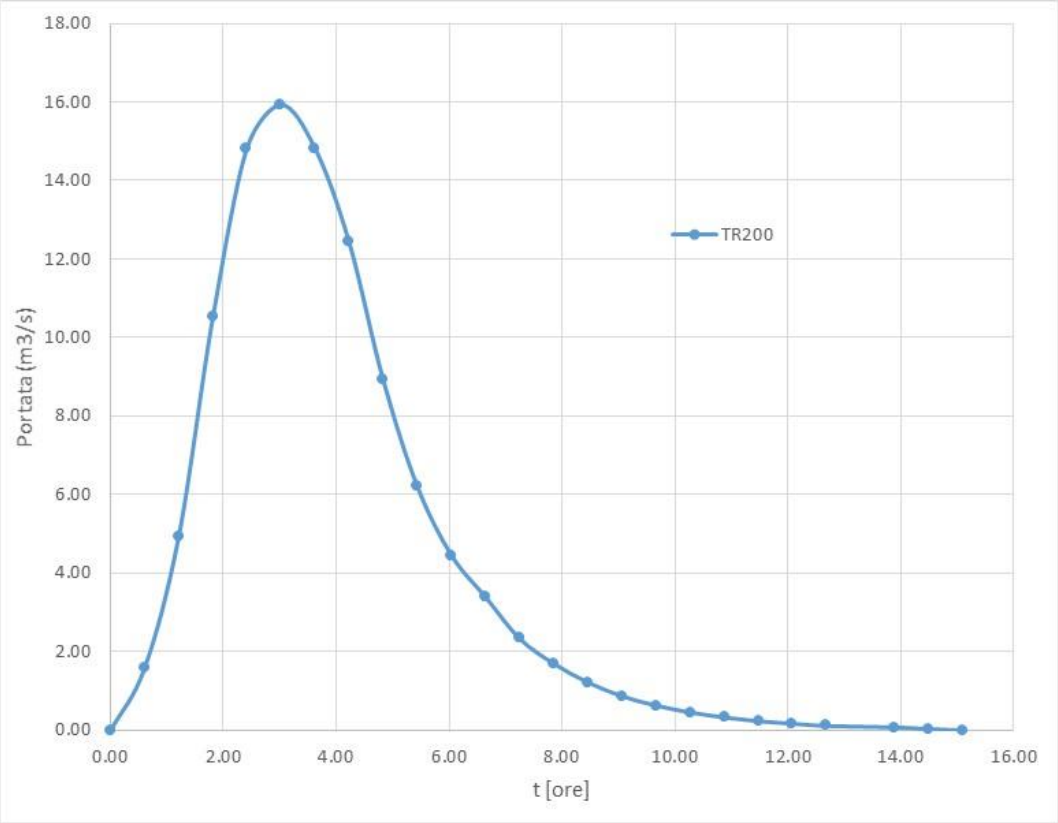


Grafico 15: Idrogramma di piena per il Bacino 3

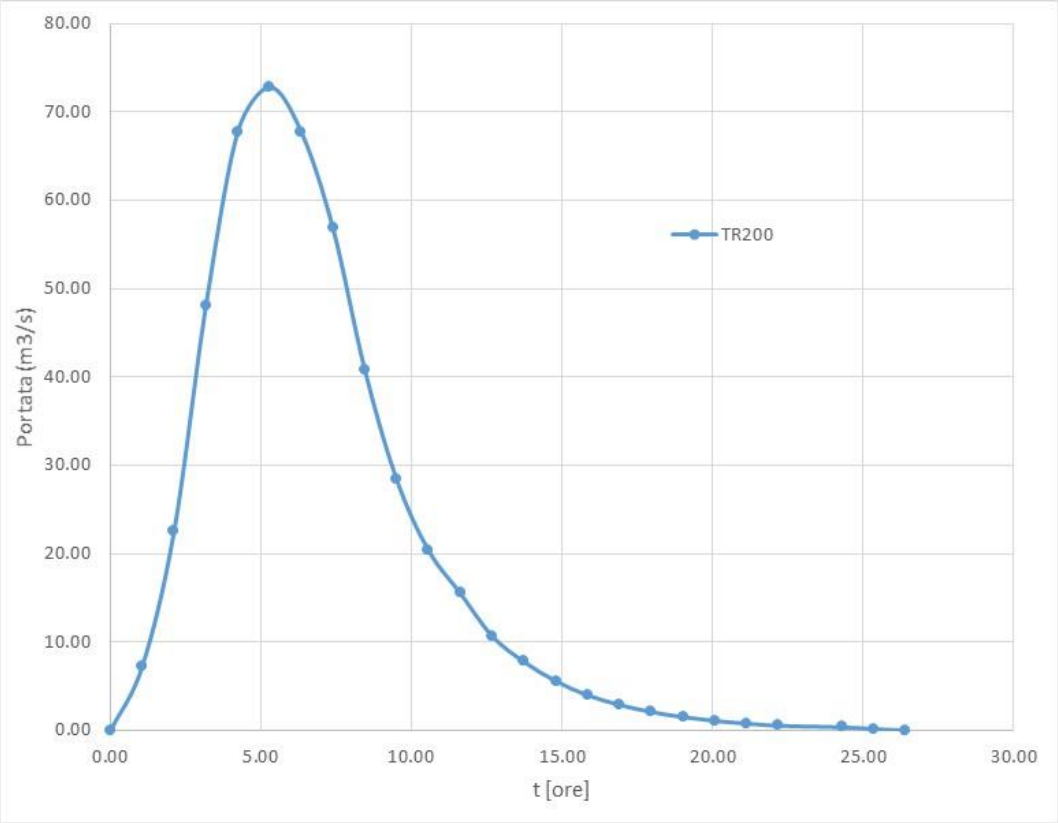


Grafico 16: Idrogramma di piena per il Bacino 4

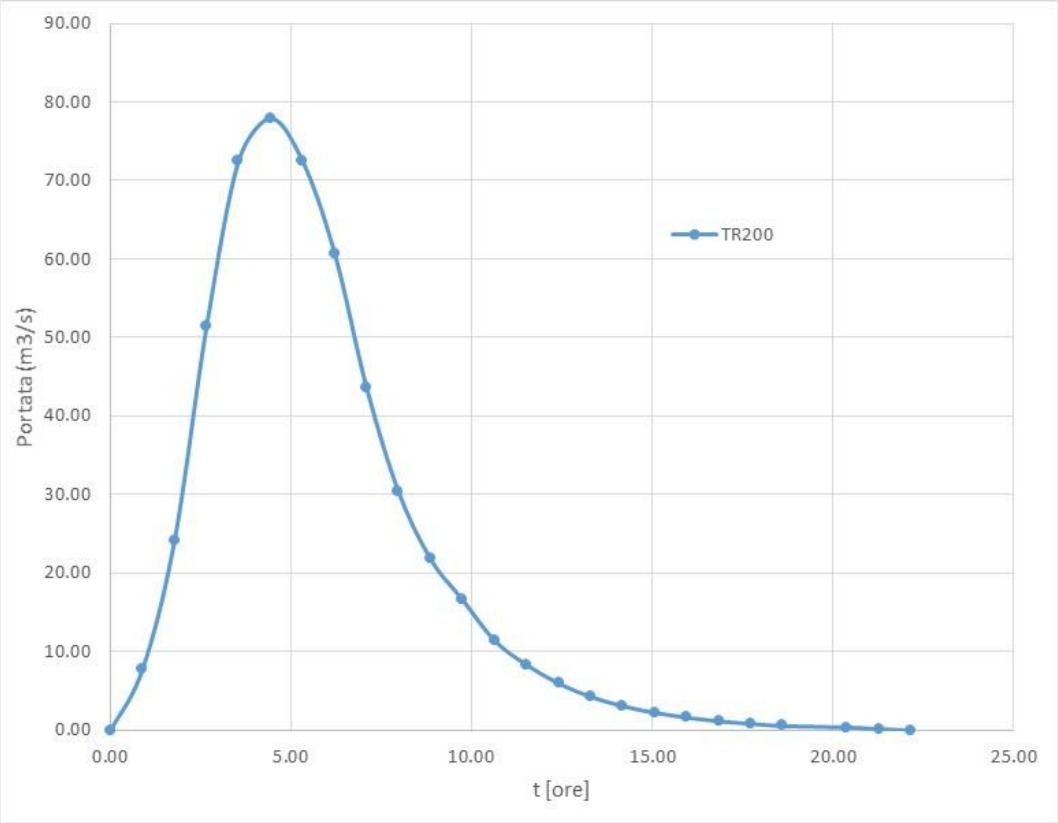


Grafico 17: Idrogramma di piena per il Bacino 5

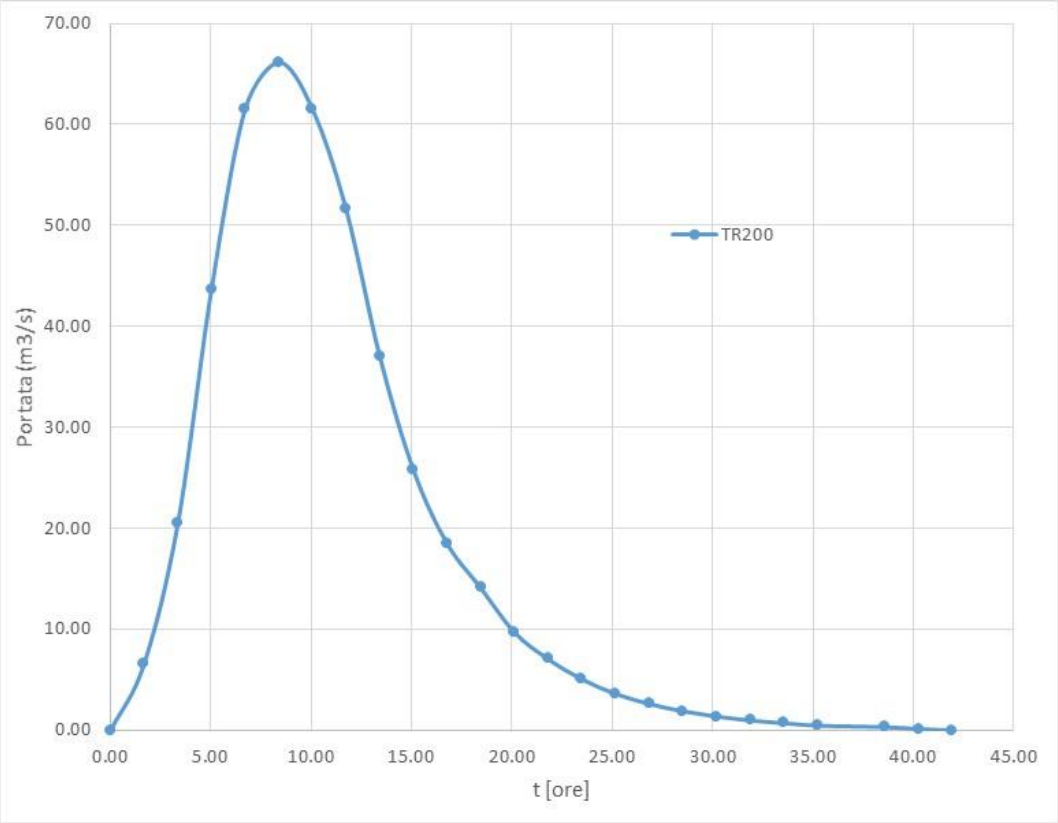


Grafico 18: Idrogramma di piena per il Bacino 6

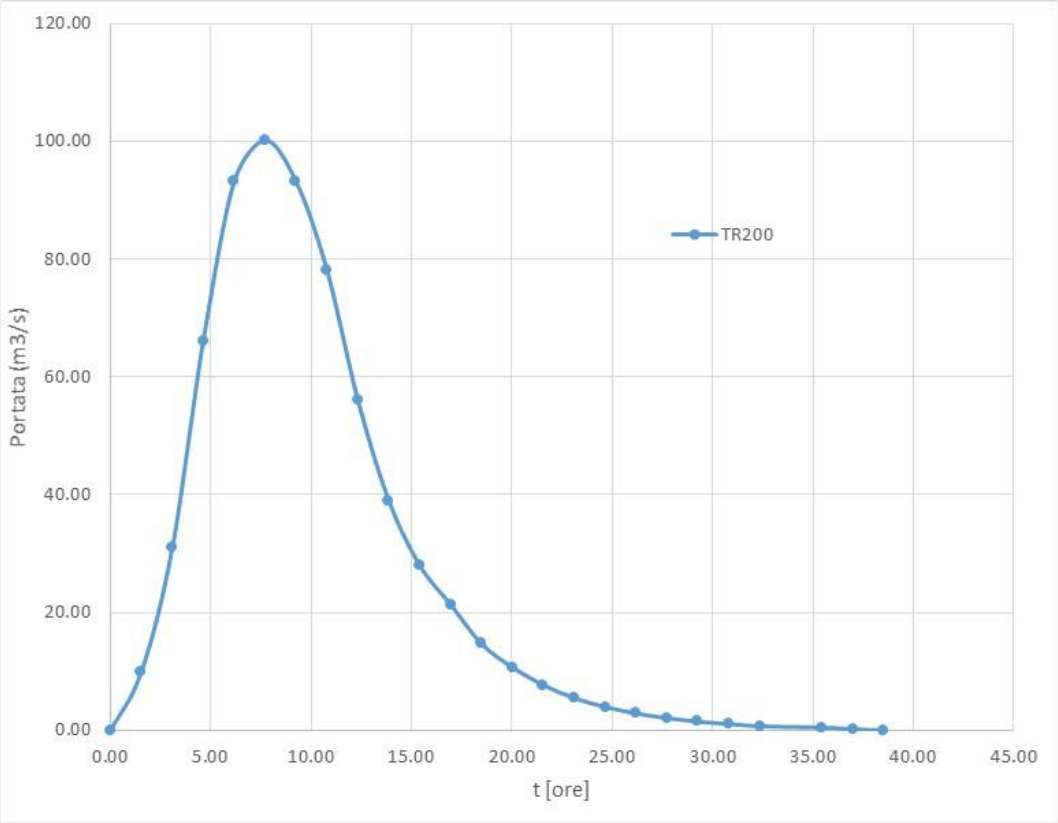


Grafico 19: Idrogramma di piena per il Bacino 7

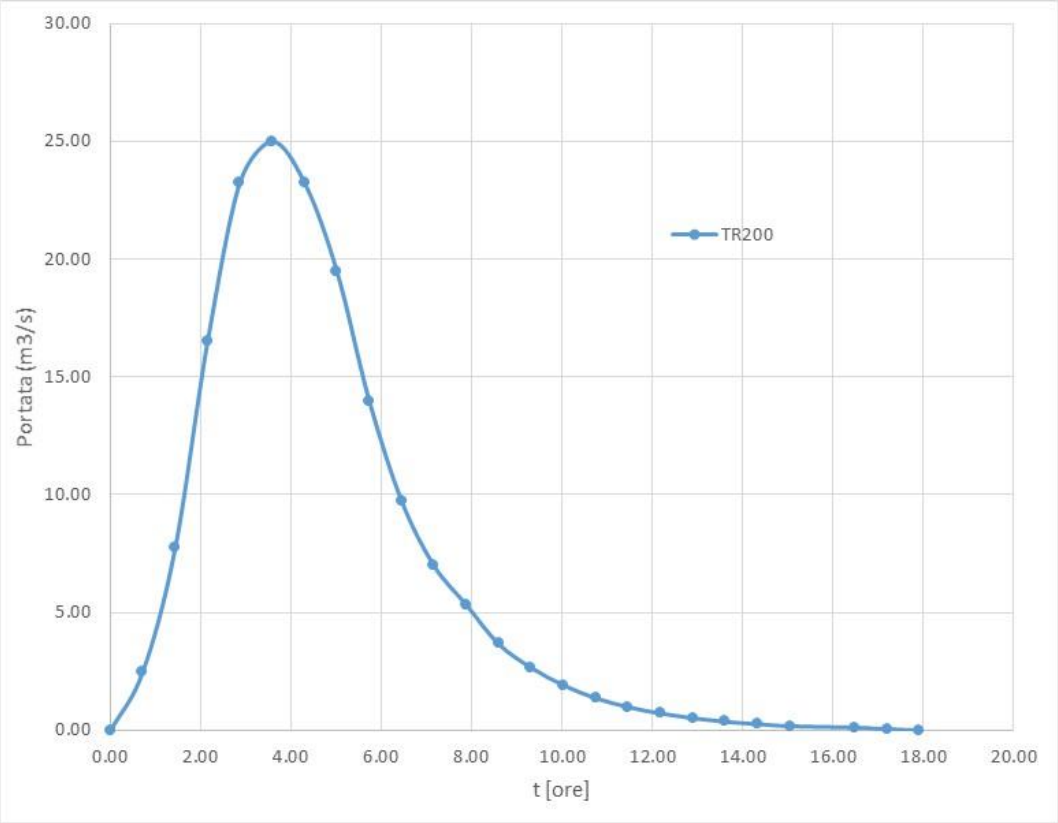


Grafico 20: Idrogramma di piena per il Bacino 8

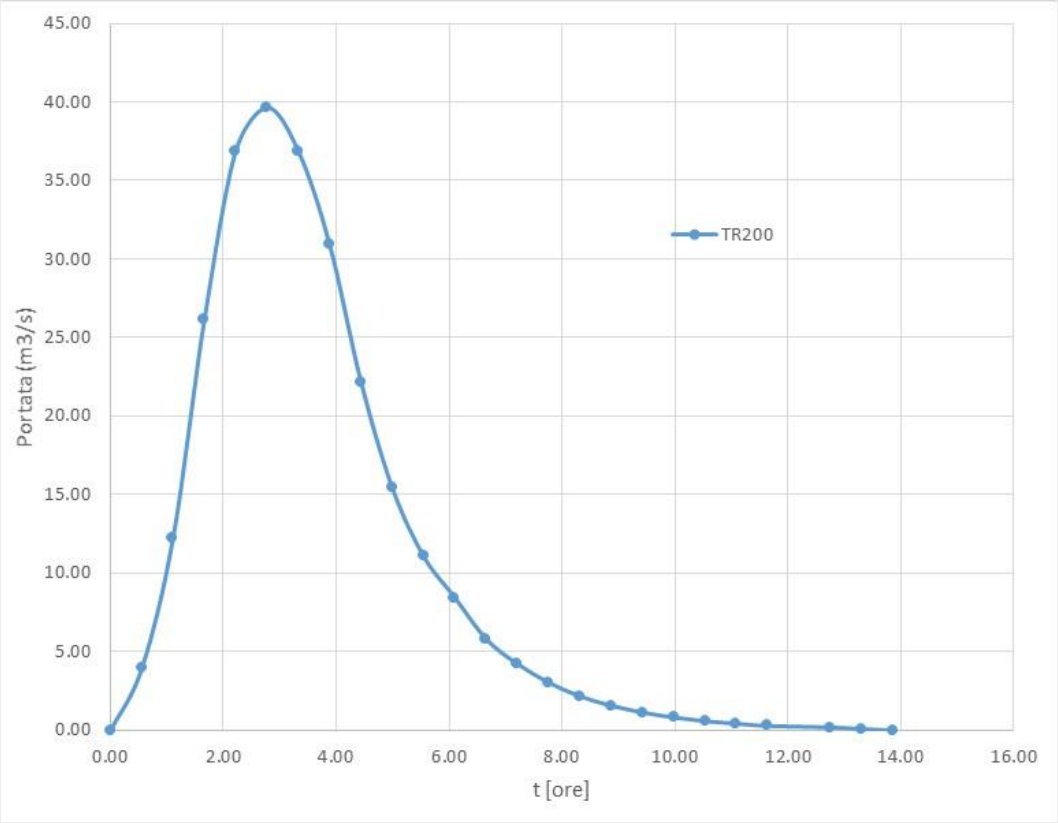


Grafico 21: Idrogramma di piena per il Bacino 9

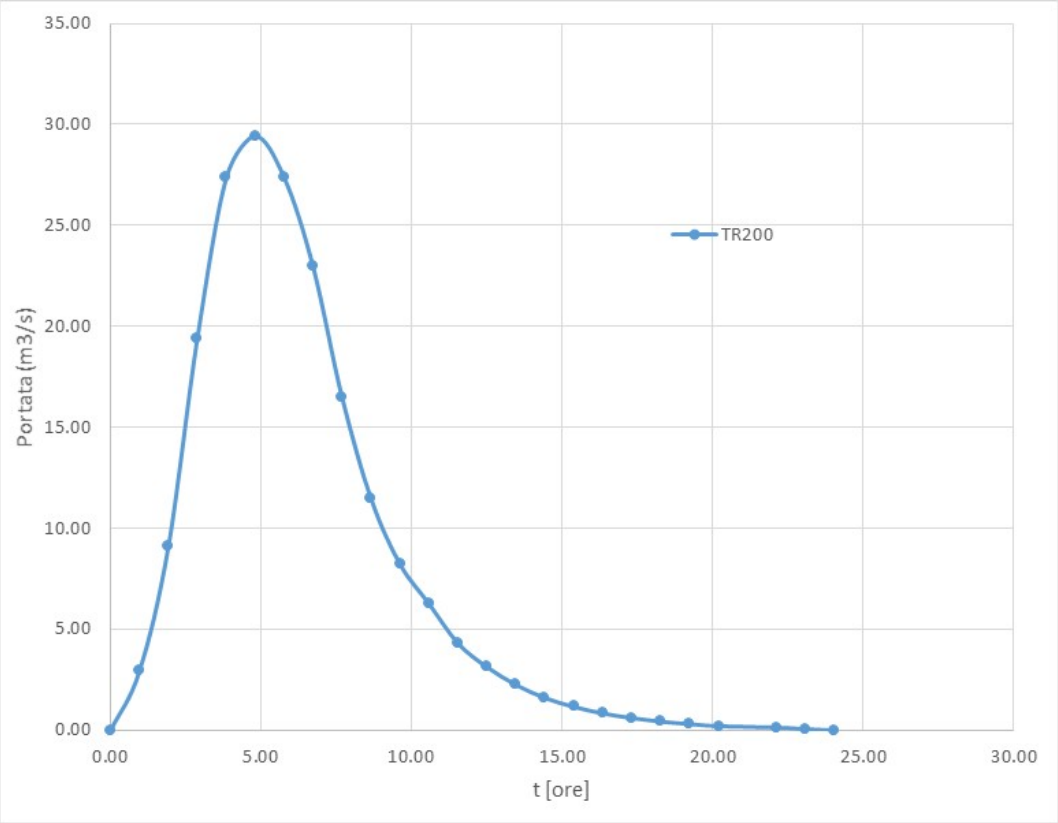


Grafico 22: Idrogramma di piena per il Bacino 10

5 ANALISI IDRAULICA

Nell'analisi idraulica si è proceduto alla verifica della sussistenza delle condizioni di sicurezza idraulica così come definite dalle NTA del PAI e alle aree di allagamento, mediante la simulazione della propagazione delle piene in moto vario nel dominio a due dimensioni (InfoWorks).

L'output dello studio idrologico-idraulico, simulando tra gli altri un evento con tempo di ritorno di 200 anni, consente di individuare la parte di territorio che si trova in "condizioni di sicurezza idraulica": infatti le NTA del PAI definiscono, all'art.36, la sicurezza idraulica come "condizione associata alla pericolosità idraulica per fenomeni di insufficienza del reticolo di drenaggio e generalmente legata alla non inondabilità per eventi di assegnata frequenza. Agli effetti del PAI si intendono in sicurezza idraulica le aree non inondate per eventi con tempo di ritorno fino a 200 anni".

Va da sé che si possano considerare in "condizione di sicurezza idraulica" tutte le aree al di fuori delle zone di deflusso per Tr=200 anni.

Una volta individuate le aree e quindi verificate in relazione a quelle rappresentate nel PAI della Puglia si potrà stabilire le condizioni di sicurezza idraulica e le eventuali opere di mitigazione del rischio.

5.1 TEORIA DEL MODELLO IDRAULICO

Il modello idraulico adoperato è **InfoWorks**, in grado di simulare la propagazione delle piene in due dimensioni e implementare le modellazioni idrologiche al suo interno al fine di risolvere le equazioni cella per cella del dominio di calcolo.

InfoWorks ICM 4.0 è specializzato nella modellazione mono e bi-dimensionale di sistemi idraulici complessi costituiti da reti idrauliche e corsi d'acqua naturali.

Definita l'estensione dell'oggetto "poligonale" (dominio 2D) all'interno di esso viene generata una "magliatura", cioè un insieme di maglie accoppiate, di forma triangolare, che costituiscono l'unità del calcolo bidimensionale. Le maglie vengono create attraverso un apposito comando in maniera automatica e tengono conto di tutti gli elementi che influenzano il moto bidimensionale all'interno del dominio. Per effettuare il processo di magliatura sono state utilizzate le informazioni plano - altimetriche del rilievo LIDAR nel formato ASCII.

Una volta creato il dominio 2D, le impostazioni relative alle maglie vengono definite nella pagina di proprietà del poligono. Tra le principali variabili vi sono:

- Massima Area Triangolo (Maximum Triangle Area): questo valore molto importante definisce la dimensione massima che può assumere ogni singola maglia triangolare durante il processo automatico di magliatura, quindi più il valore è piccolo e più dettagliata sarà la griglia di calcolo
- Condizioni al contorno (Boundary Type): questa proprietà definisce il comportamento che l'acqua deve assumere qualora arrivasse a lambire il confine del poligono durante la simulazione. Nel presente studio è stata utilizzata l'impostazione : "Normal condition" ovvero si assume che la pendenza del terreno bilanci le forze d'attrito (flusso normale o uniforme); l'altezza e la velocità vengono mantenute costanti quando l'acqua raggiunge il confine, in modo che l'acqua possa fluire al di fuori del poligono senza perdite di carico;
- Scabrezza Manning (Roughness): la scabrezza viene attribuita a tutti triangoli creati durante il processo di magliatura. È possibile indicare localmente altri valori di scabrezza, il valore generale indicato in questo campo verrà utilizzato dove non specificato diversamente. Il modello usato per la

rappresentazione matematica del flusso, sia mono che bi-dimensinale è basato sull'equazione dell'acqua superficiale, relativa cioè all'altezza media che si ricava dalle equazioni di Navier – Stokes:

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

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

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

Dove:

- h è l'altezza dell'acqua;
- u e v sono rispettivamente le velocità nelle direzioni x e y;
- $S_{0,x}$ e $S_{0,y}$ sono rispettivamente le pendenze dell'alveo nelle direzioni x e y;
- $S_{f,x}$ e $S_{f,y}$ sono rispettivamente gli attriti nelle direzioni x e y;
- q1D è la portata per unità di area;
- u_{1D} e v_{1D} sono rispettivamente le componenti di velocità della portata q1D nelle direzioni x e y.

Questa formulazione conservativa dell'equazione dell'acqua superficiale è discretizzata utilizzando un sistema di primo ordine esplicito del volume finito. La tecnica di frazionamento del flusso assicura la proprietà del buon equilibrio bilanciando la pendenza con la pressione, termini a riposo. Per gestire la distinzione tra celle bagnate ed asciutte, viene utilizzata una soglia detta h0. Durante il calcolo, le celle a cui è associato un tirante idrico inferiore alla soglia sono considerate asciutte, dunque sia il tirante che la velocità vengono posti a zero. Il valore di default per questa profondità di soglia è 1mm.

5.2 DESCRIZIONE DEL MODELLO COMPUTAZIONALE

Il primo step di applicazione dei modelli idraulici ha riguardato la ricostruzione del modello plano-altimetrico dell'area di studio. Nel nostro studio sono state utilizzate le informazioni plano - altimetriche del rilievo LIDAR nel formato ASCII.

Considerata l'estensione dell'area di studio e i numerosi reticoli idrografici in interferenza con le opere a realizzarsi, si è ritenuto opportuno procedere alla definizione di tre domini computazionali: Dominio Tronco 1, Dominio Tronco 2 e Dominio Tronco 3.

Per ciascun modello è stata definita la dimensione della cella della griglia di calcolo, valutata in relazione al livello di dettaglio ricercato. La maglia utilizzata varia tra una superficie massima di 100 m^2 e una minima di 10 m^2 con un valore massimo di variazione in altezza pari ad 0.25 m.

Inoltre, ai domini di studio è stato associato un coefficiente di scabrezza "n" pari a 0,033.

L'immissione delle portate corrispondenti all'evento di piena è stata effettuata tramite l'inserimento di punti sorgenti 2D posizionabili in un punto qualunque della magliatura e in corrispondenza delle aste di reticolo idrografico interferenti con le opere di progetto. A ciascun punto sorgente 2d è stato associato un idrogramma di piena, facendo attenzione ad allineare le rispettive portate di picco.

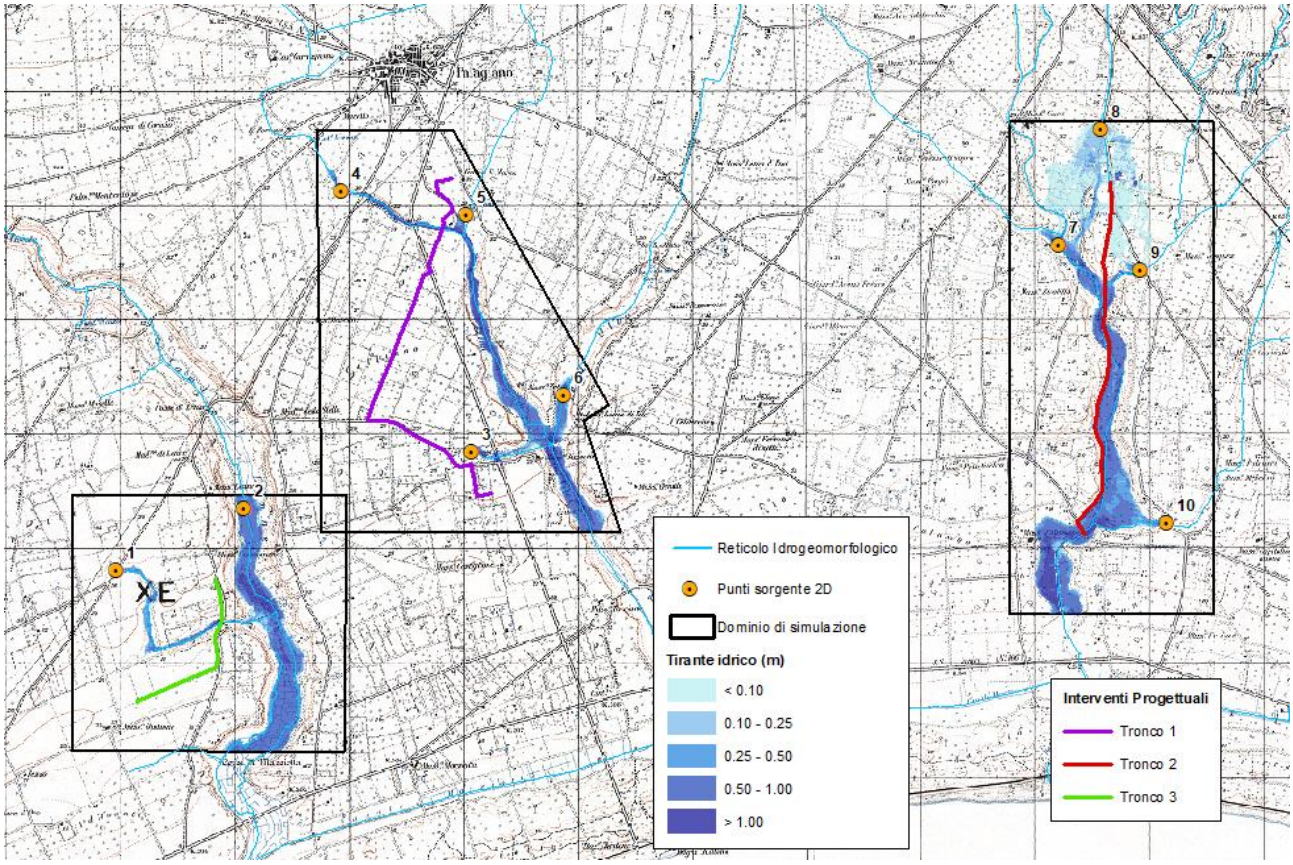


Figura 9: Analisi Idraulica Bidimensianale

Gli output delle simulazioni in corrispondenza del tempo di ritorno di 200 anni vengono riportati come allegati alla presente.

6 CONCLUSIONI

Il presente studio ha riguardato la verifica della compatibilità idraulica con le NTA del PAI Puglia del progetto per il Riutilizzo ai fini irrigui delle acque reflue affinate licenziate dai depuratori a servizio degli abitati di Palagiano e Massafra.

In particolare, verifica la sussistenza delle condizioni di sicurezza idraulica del posizionamento delle tubazioni interrate previste, in funzione del reticolo idrografico superficiale ufficiale, così come mostrato nella cartografia ufficiale I.G.M. in scala 1:25.000, ai sensi delle NTA del PAI redatte dall'AdB Puglia, come da ultimo aggiornate dalla D.G.R. 1675 DEL 08/10/2020.

Tale verifica, come già precisato in premessa, è stata necessaria in quanto il progetto in oggetto risulta vincolato dagli artt. 6, 7, 8, 9 e 10 delle NTA del PAI Puglia, come da ultimo aggiornate dalla D.G.R. 1675 del 08/10/2020. Per tali verifiche, è stato effettuato uno studio idrologico dell'area in esame per un tempo di ritorno di 200 anni.

Il metodo utilizzato per la trasformazione degli afflussi in deflussi è quello del SCS - Curve Number, mettendosi in condizioni cautelative di umidità del bacino antecedente l'evento, ovvero quelle relative al CNIII.

Per quanto attiene la modellazione idraulica per l'individuazione delle aree di allagamento con tempo di ritorno di 200 anni, si è effettuato uno studio bidimensionale in condizioni di moto vario a parametri concentrati con il software InfoWorks.

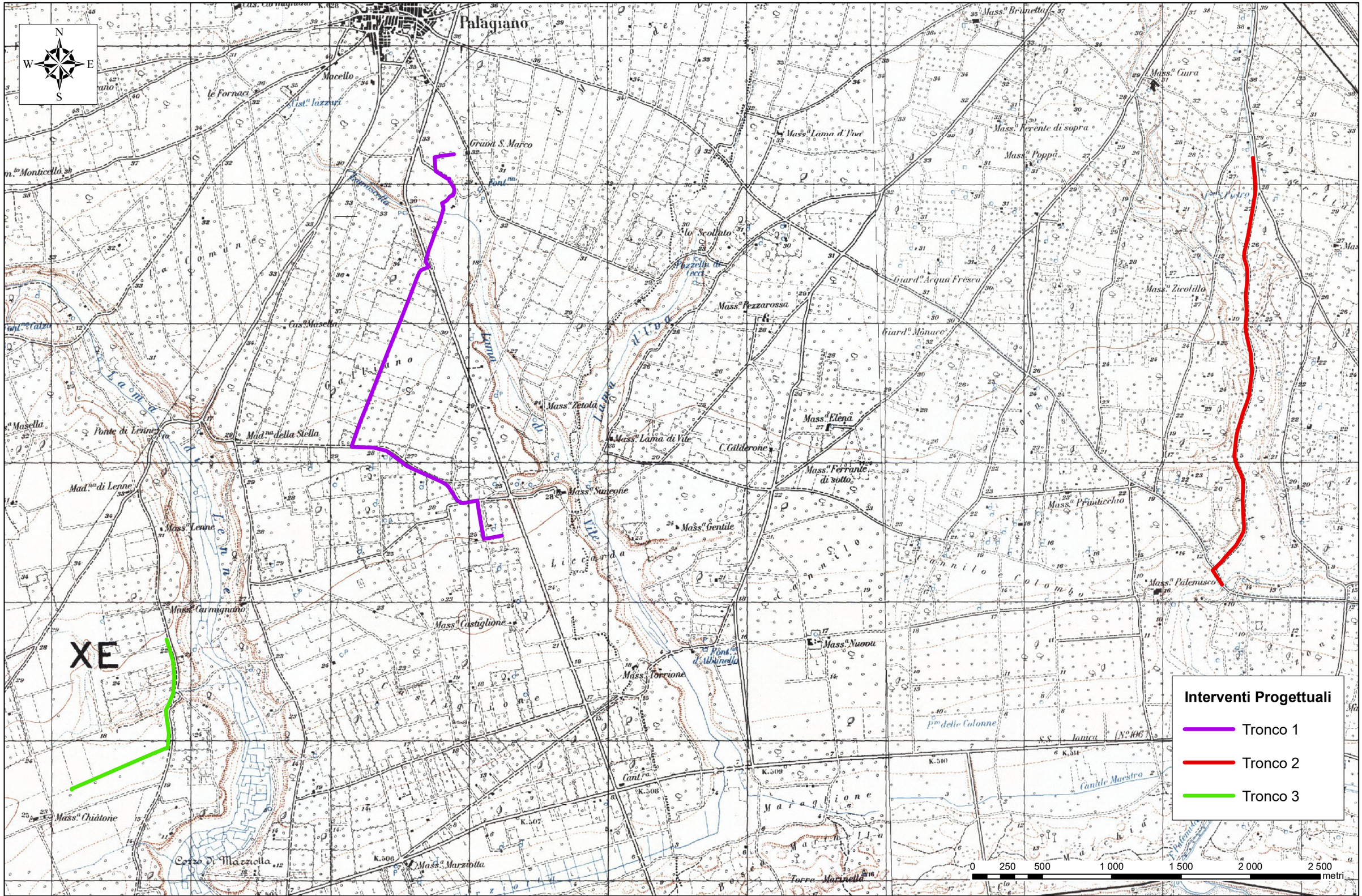
Dalle risultanze del suddetto approccio è stata definita l'impronta della piena duecentennale al di fuori della quale risulta verificata la compatibilità idrologica ed idraulica degli interventi proposti.

Si precisa che, tutti gli attraversamenti dei corsi d'acqua individuati dal P.A.I., saranno realizzati esclusivamente mediante tecnica della trivellazione orizzontale controllata (T.O.C.); gli stessi saranno realizzati senza compromettere la stabilità delle opere sovrastanti e in modo da non ostacolare eventuali futuri interventi di sistemazione idraulica e/o mitigazione del rischio; inoltre i punti di inizio/fine perforazione saranno esterni alle aree allagabili con tempo di ritorno di 200 anni, individuate a seguito del presente studio, e la posa del cavidotto verrà effettuata con modalità tali che lo stesso non risenta degli effetti erosivi di piene conseguenti a eventi di piena; al termine dei lavori sarà ripristinato l'iniziale altimetria dei luoghi.

In corrispondenza dell'impronta di allagamento sulla piattaforma stradale, saranno previste opportune accortezze costruttive atte a proteggere le stesse tubazioni da possibili danneggiamenti dovuti ad eventi di piena e/o conseguenti azioni erosive esercitate dalla corrente idrica, mediante l'impiego di bauletto in misto cemento.

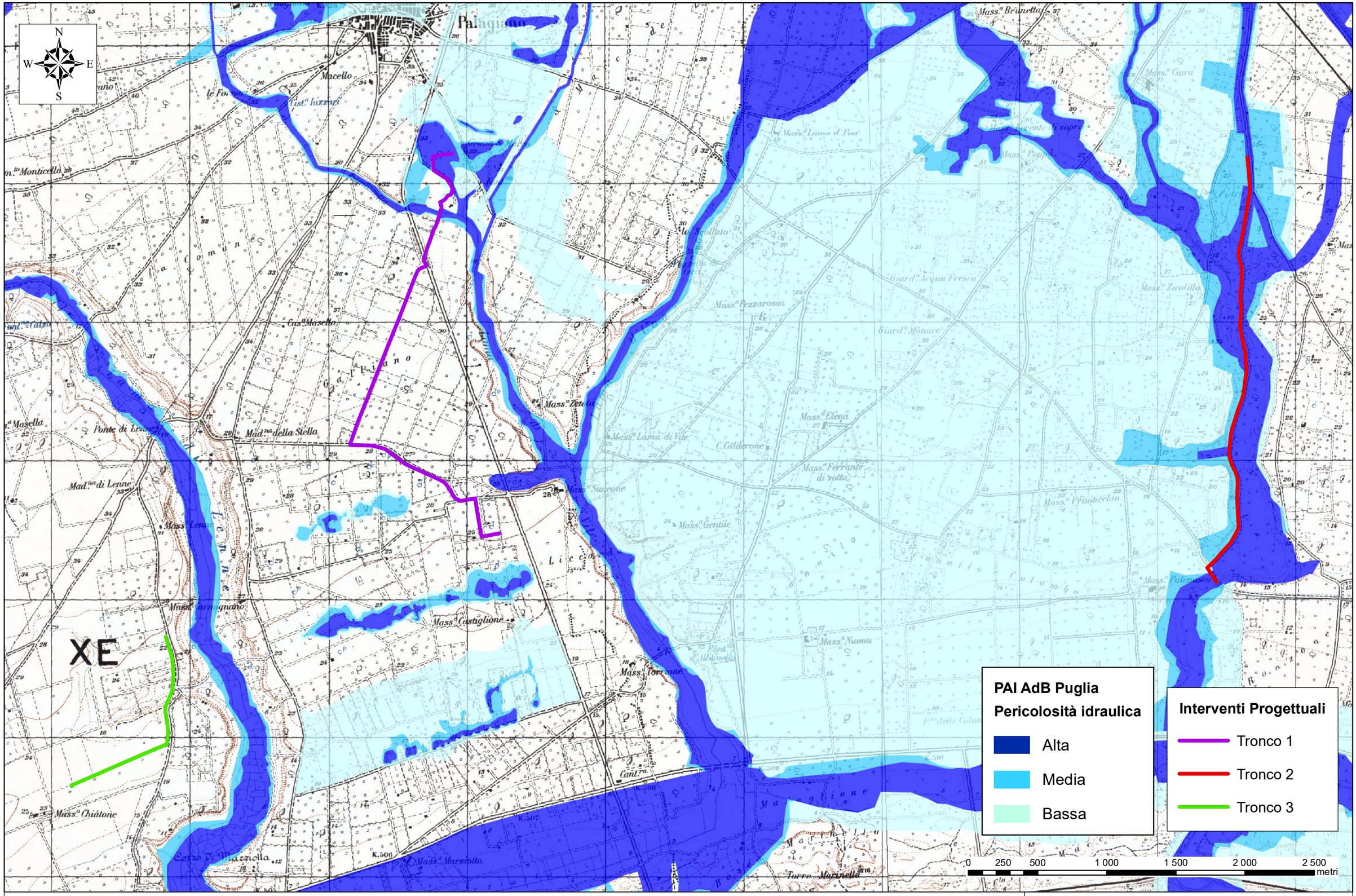
Inoltre, ai fini di una corretta realizzazione di tutte le opere previste nel progetto, si garantirà la sicurezza, evitando sia l'accumulo di materiale, sia qualsiasi altra forma di ostacolo al regolare deflusso delle acque; gli scavi saranno tempestivamente richiusi e ripristinati a regola d'arte, evitando l'infiltrazione di acqua all'interno degli scavi sia durante i lavori e sia in fase di esercizio.

Le planimetrie di dettaglio delle aree inondabili sono riportate in allegato alla presente relazione.



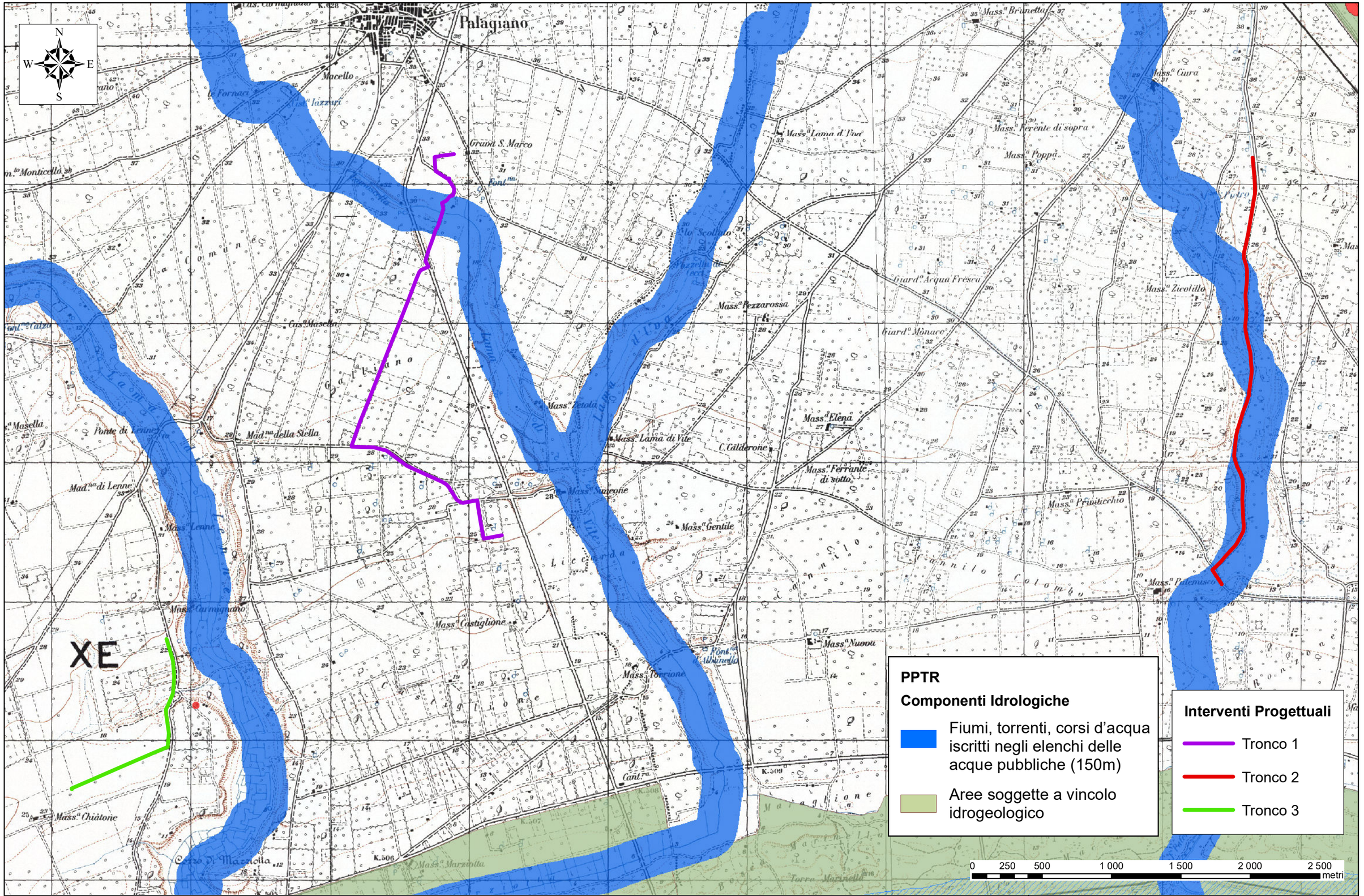
Inquadramento Territoriale Cartografico su IGM serie 25v - scala 1:25.000

ALLEGATO 1



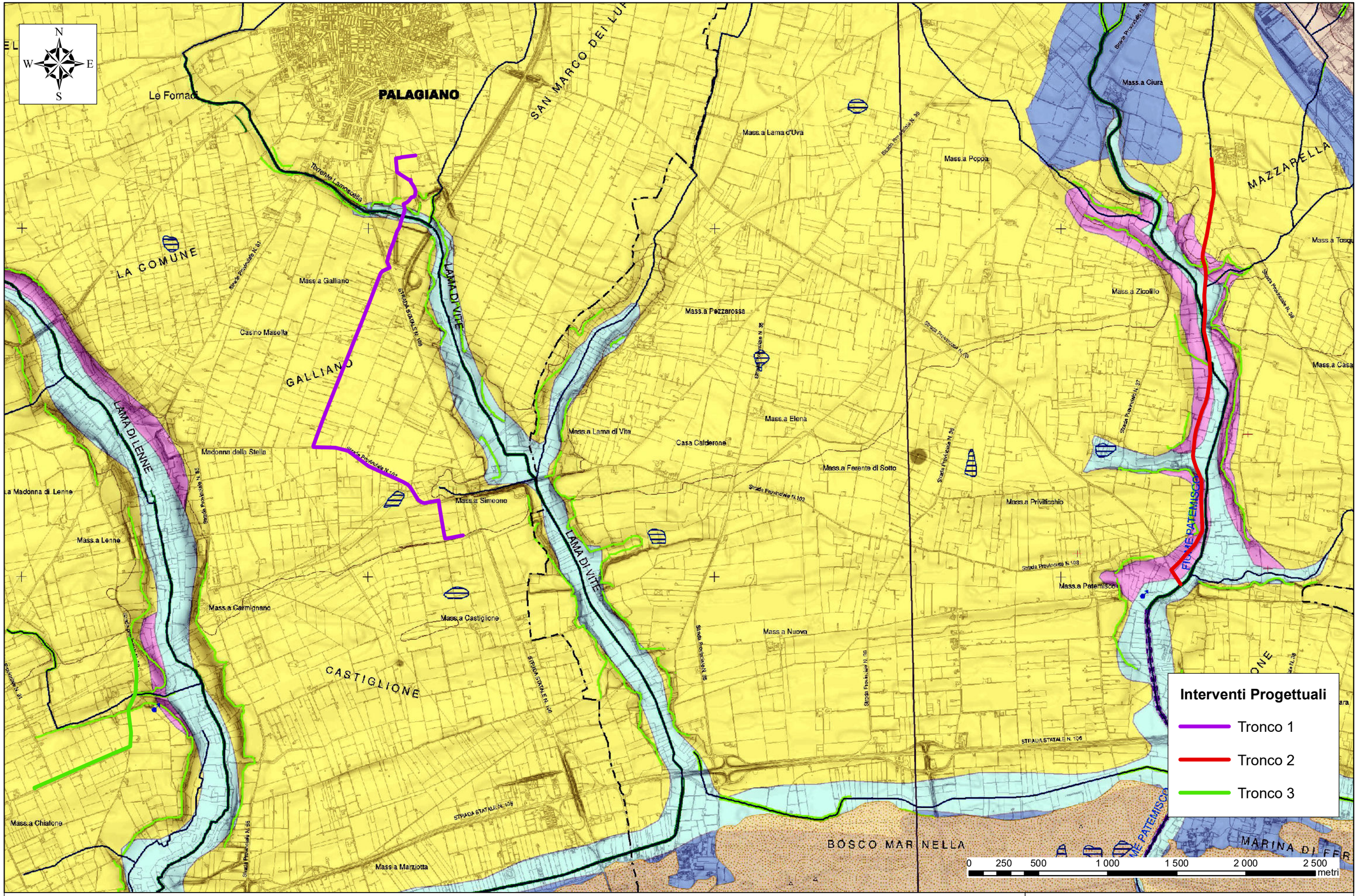
Pericolosità idraulica Piano di Assetto Idrogeologico - scala 1:25.000

ALLEGATO 2



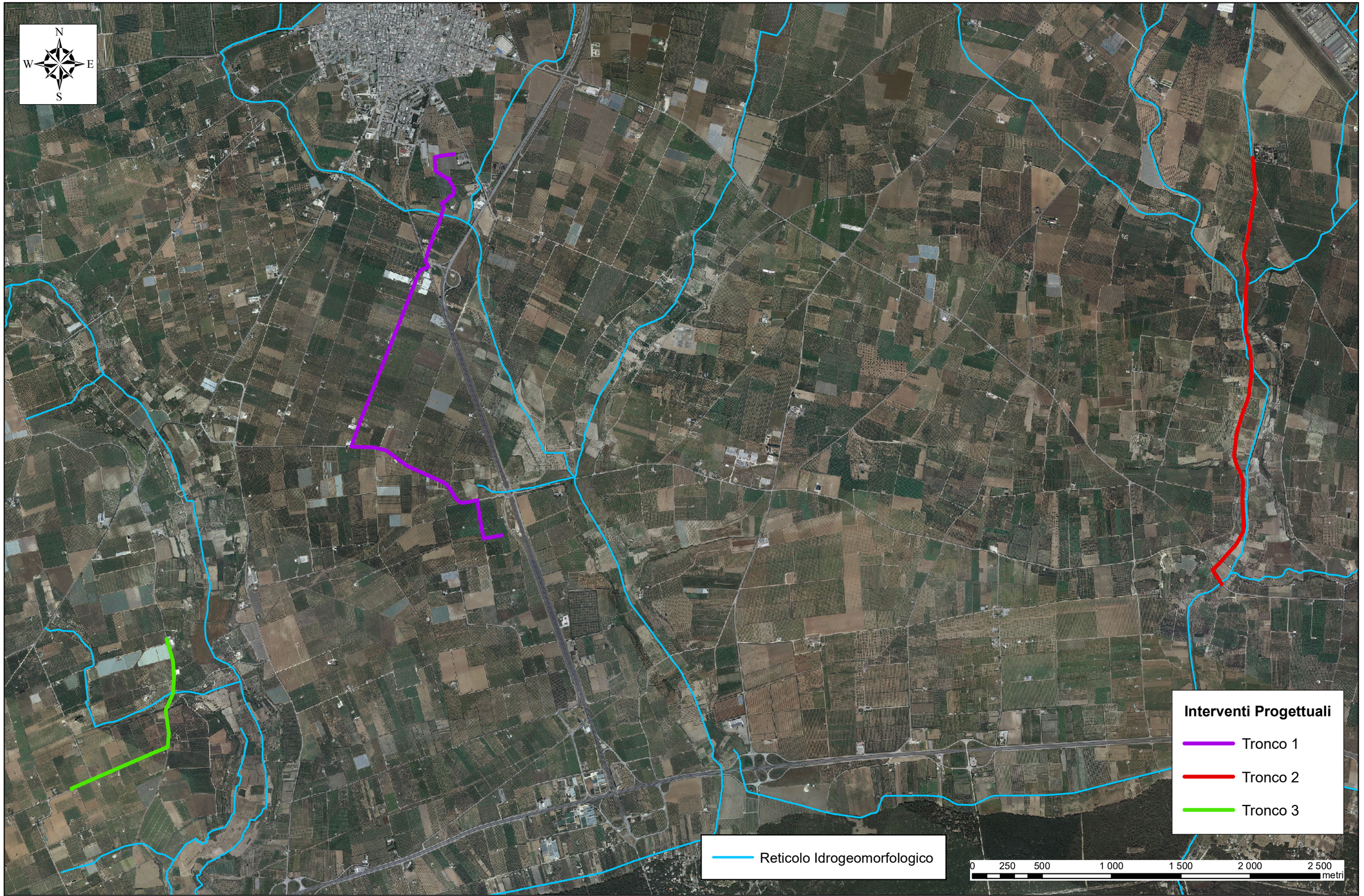
Componenti Idrologiche Piano Paesaggistico Territoriale Regionale - scala 1:25.000

ALLEGATO 3



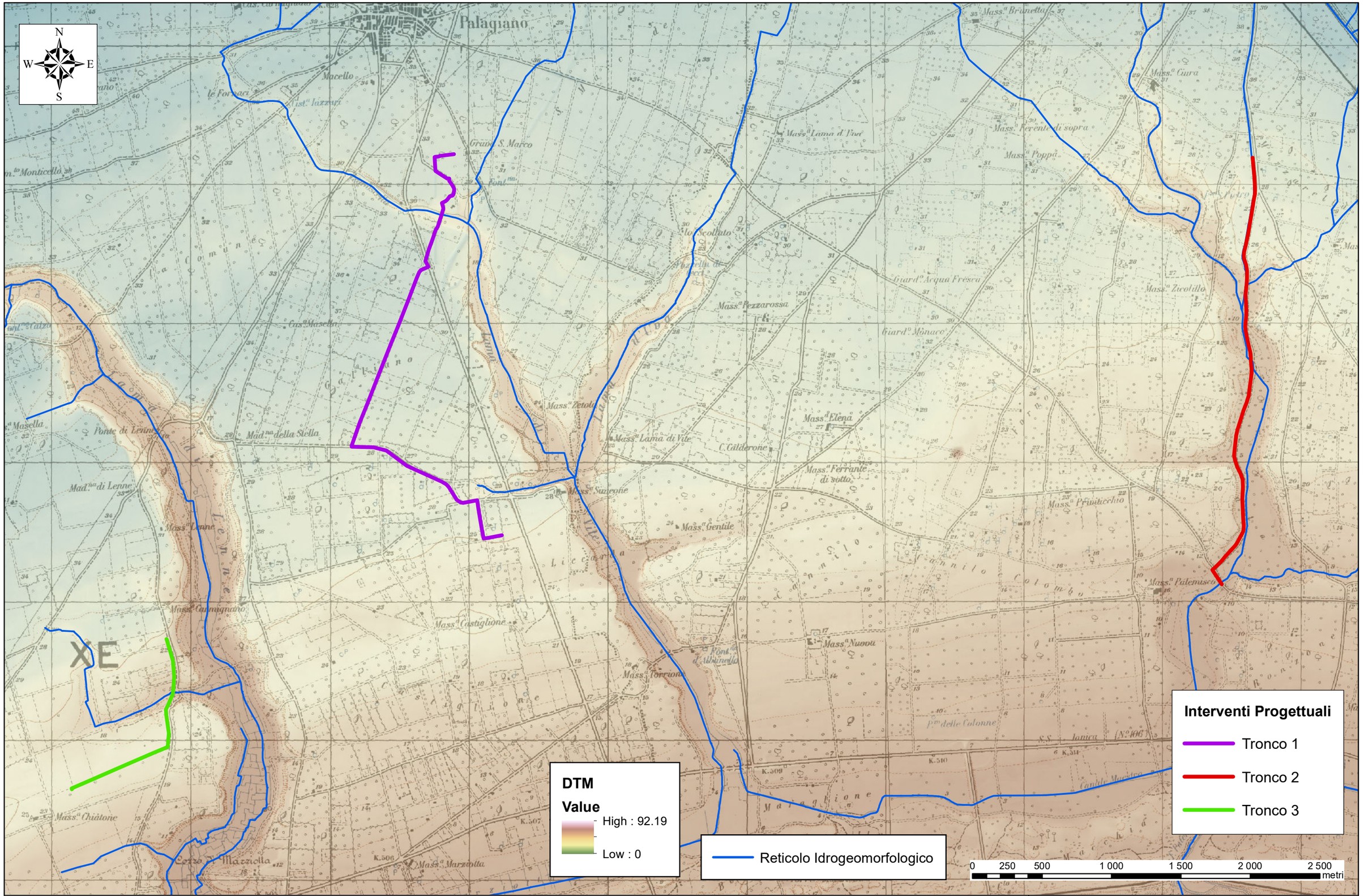
Inquadramento Territoriale Cartografico su Carta Idrogeomorfologica AdB Puglia - scala 1:25.000

ALLEGATO 4



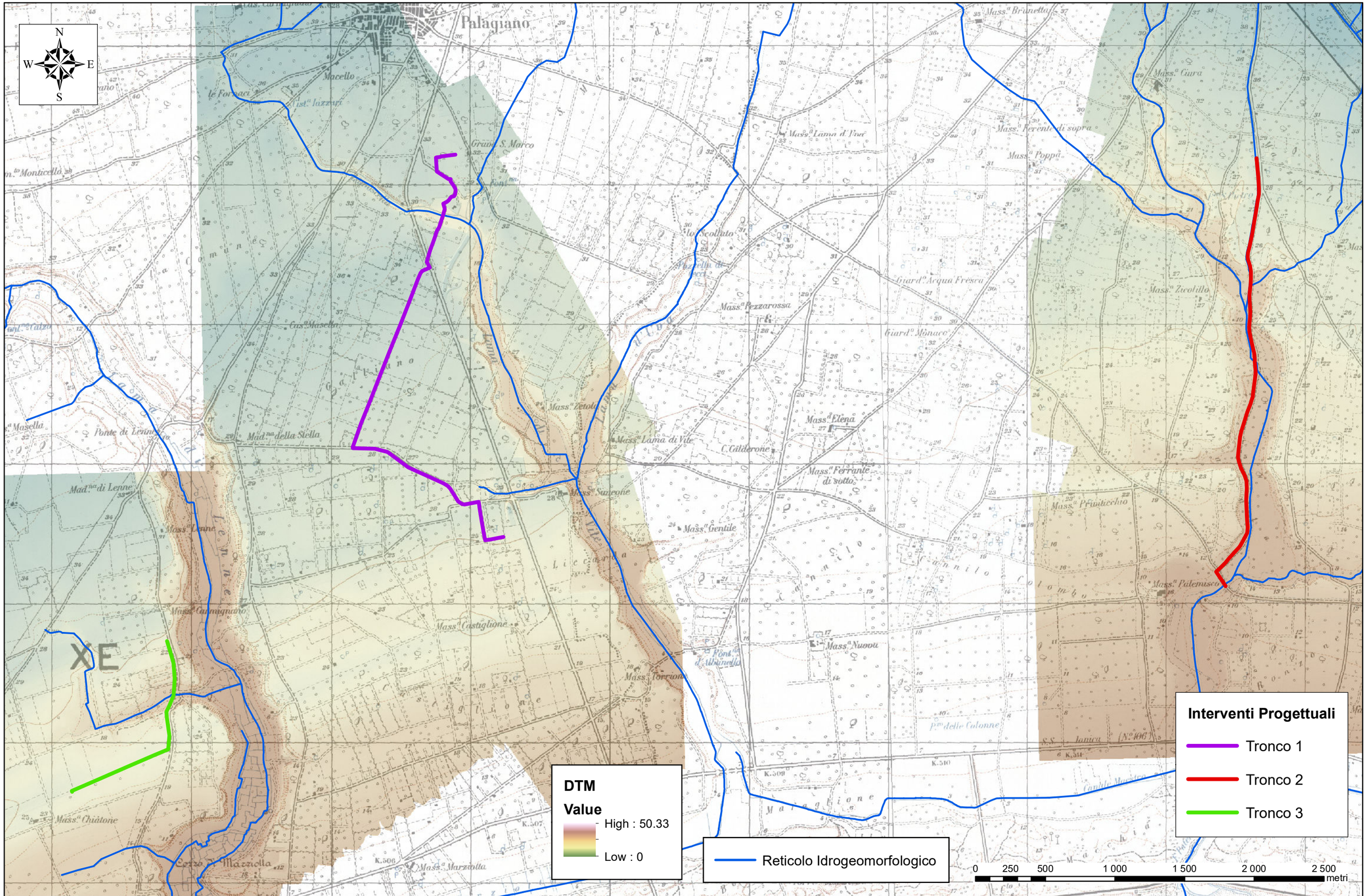
Inquadramento Territoriale Cartografico su Ortofoto - scala 1:25.000

ALLEGATO 5



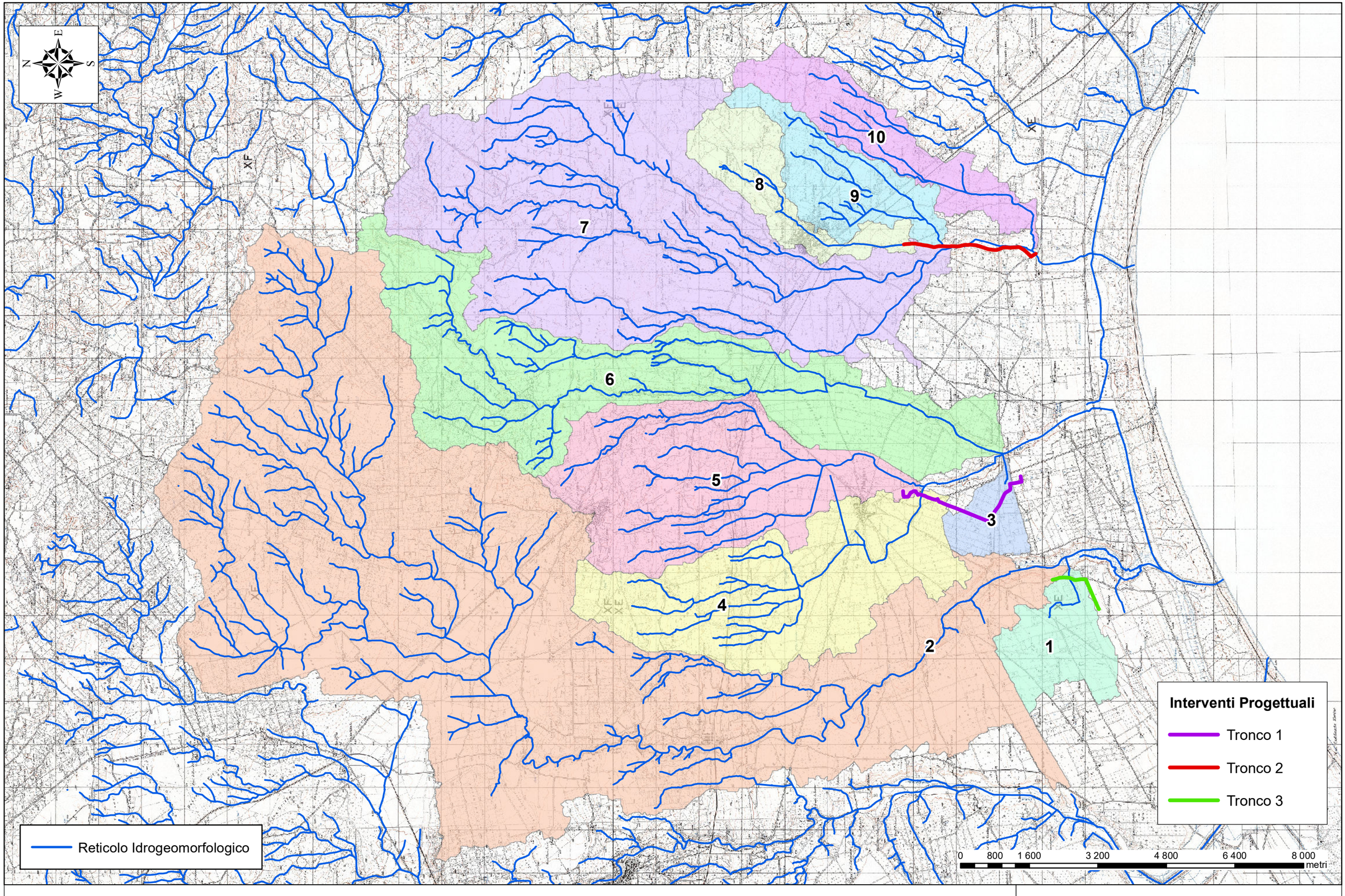
Modello Digitale del Terreno SIT Puglia (celle 8 m x 8 m) - scala 1:25.000

ALLEGATO 6



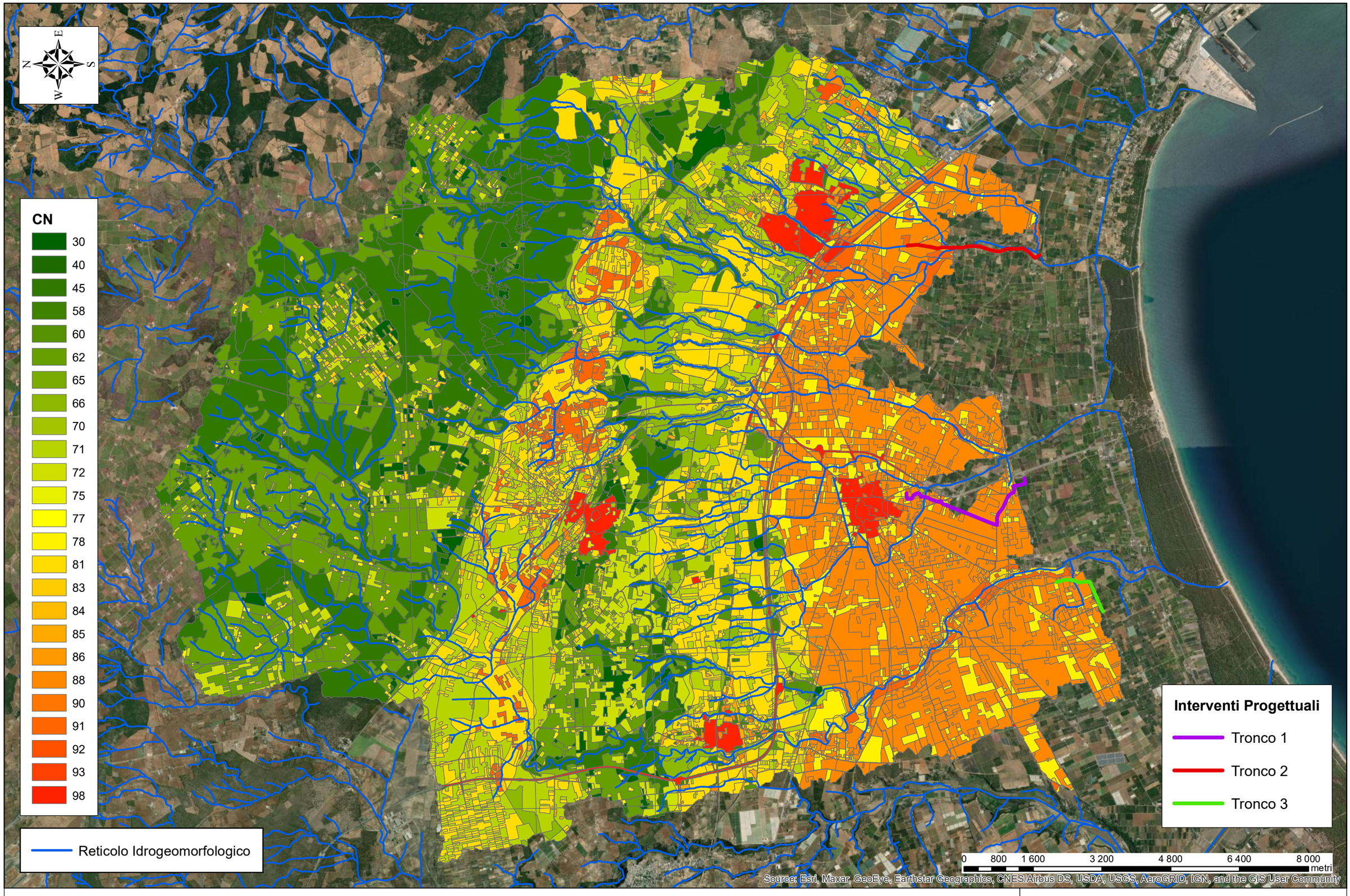
Modello Digitale del Terreno da Rilievo LIDAR del MATTM (celle 1 m x 1 m) - scala 1:25.000

ALLEGATO 7



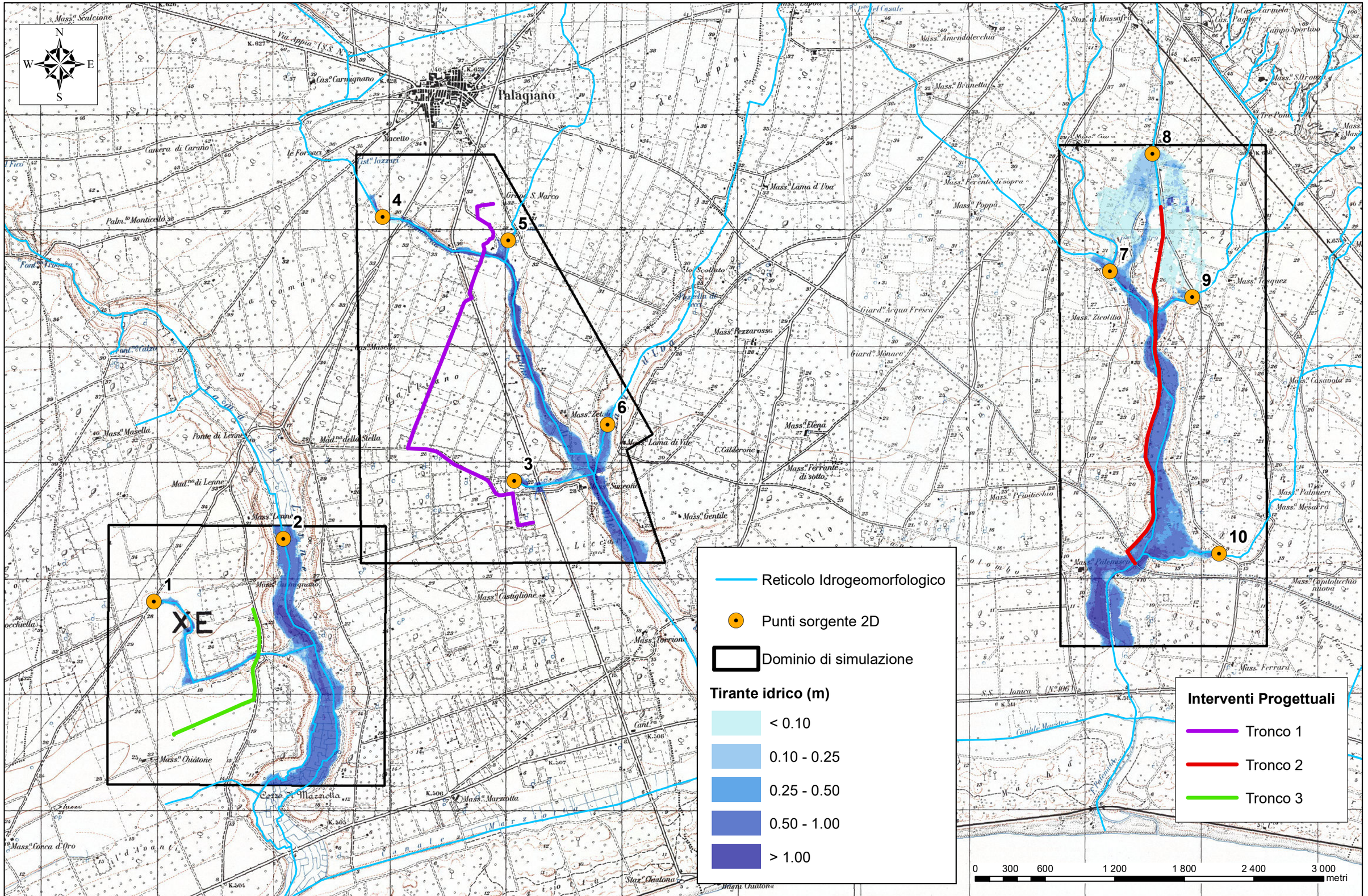
Bacini Idrografici - scala 1:80.000

ALLEGATO 8



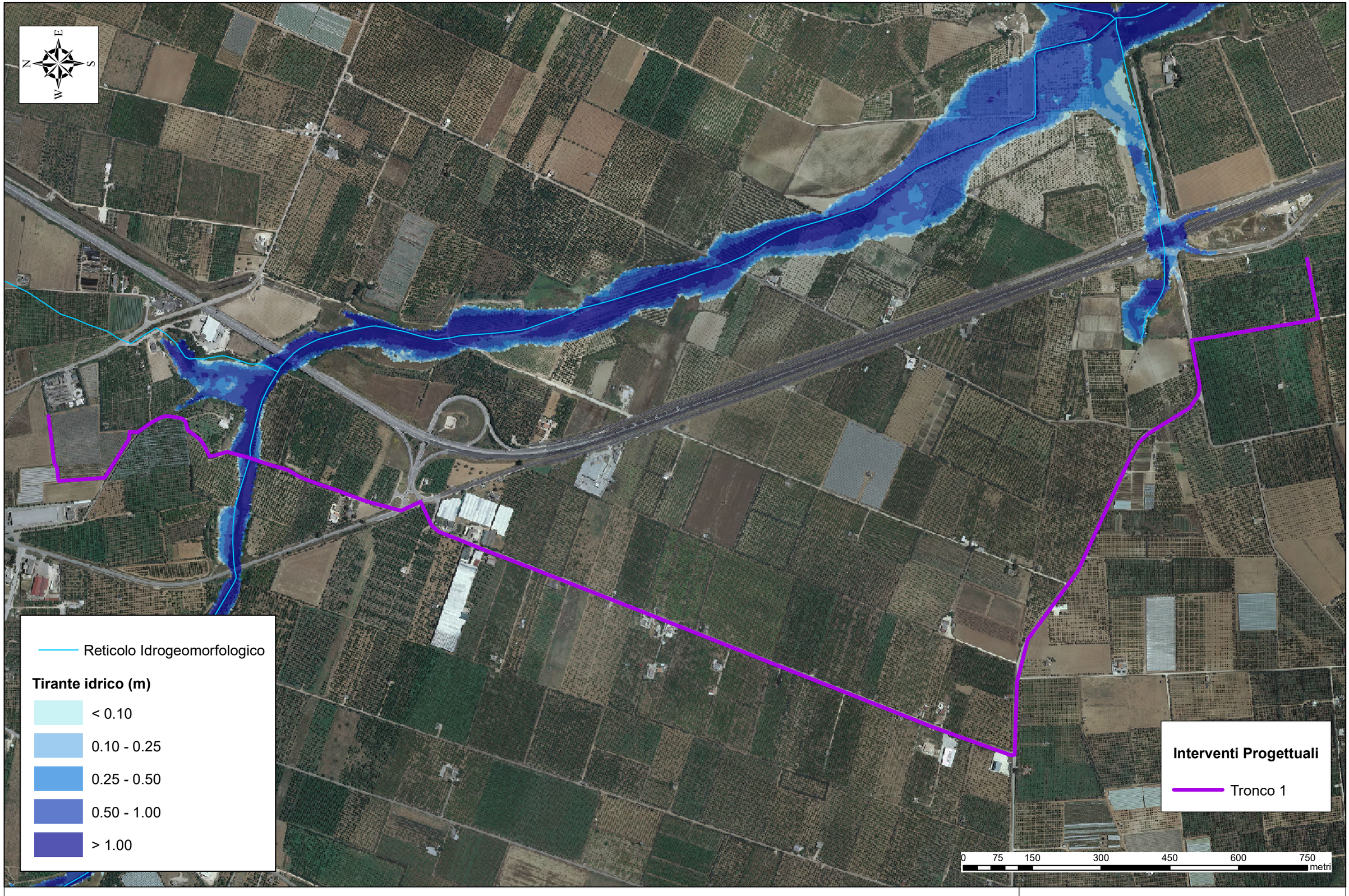
Curve Number - scala 1:80.000

ALLEGATO 9



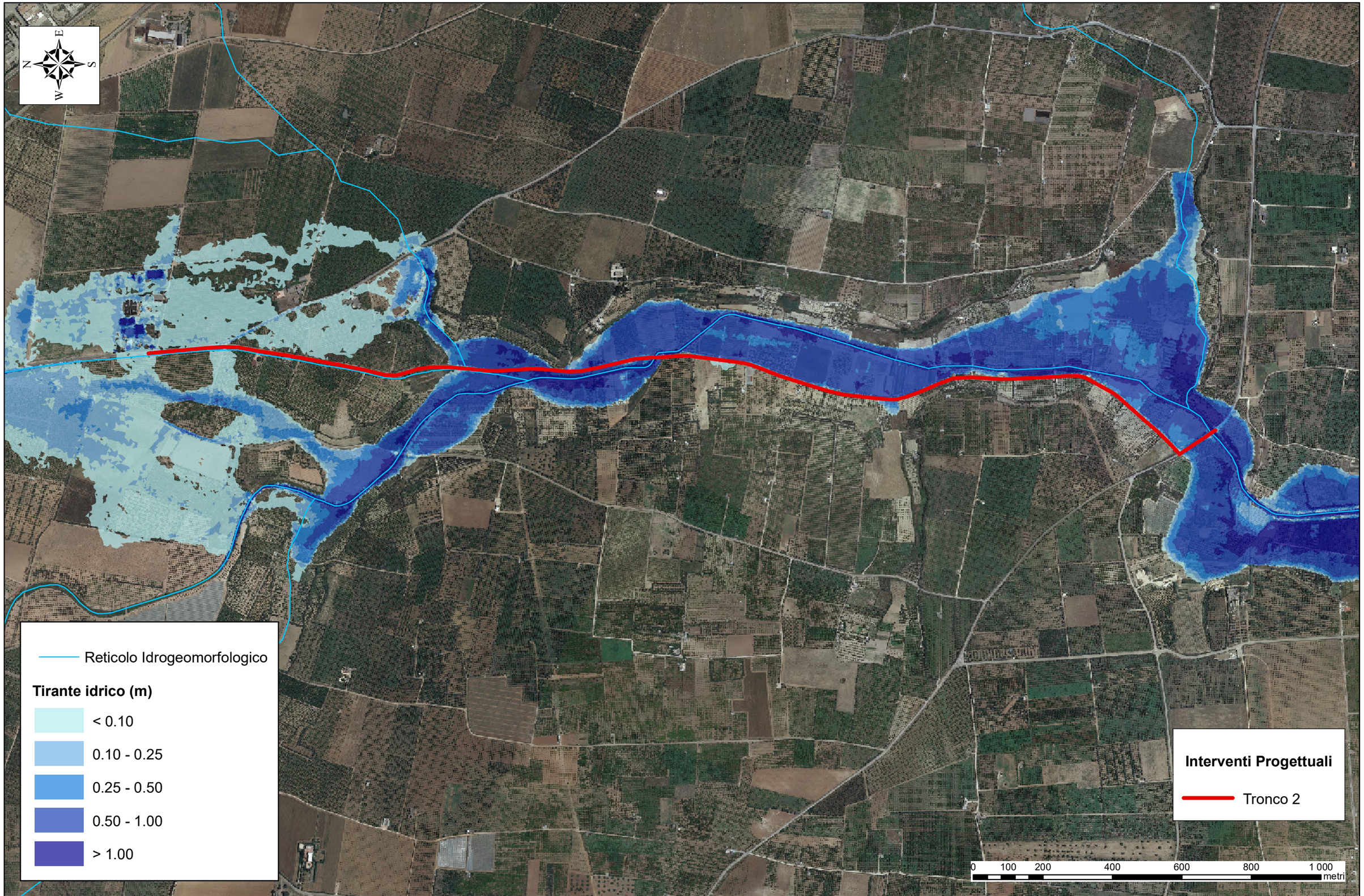
Analisi Idraulica Bidimensionale per Tr 200 anni - scala 1:30.000

ALLEGATO 10



Dettaglio Analisi Idraulica Bidimensionale per Tr 200 anni - INTERVENTO 1 - scala 1:7.500

ALLEGATO 10.1



Dettaglio Analisi Idraulica Bidimensionale per Tr 200 anni - INTERVENTO 2 - scala 1:10.000

ALLEGATO 10.2

N
W E
S

Reticolo Idrogeomorfologico

Tirante idrico (m)

< 0.10

0.10 - 0.25

0.25 - 0.50

0.50 - 1.00

> 1.00

Interventi Progettuali

Tronco 3

0 75 150 300 450 600 750
metri

Dettaglio Analisi Idraulica Bidimensionale per Tr 200 anni - INTERVENTO 3 - scala 1:7.500

ALLEGATO 10.3