

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J71H92000020011

S.O. IDRAULICA

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA

QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica-Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I Q 0 1 0 1 R 0 9 R I I D 0 0 0 2 0 0 2 B

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato Data |
|------|---|-------------|-------------------|------------|-------------------|----------------|-------------------|--|
| A | Emissione esecutiva | C. Cesali | Settembre 2021 | F. Cabas | Settembre 2021 | M. Berlingieri | Settembre 2021 | F. Cabas Dicembre 2023 |
| B | Ri-emissione per recepire richieste RFI e CSLPP | M. Faccioli | 12.2023 | C. Cesali | 12.2023 | L. Martinelli | 12.2023 | ITALFERR S.p.A. Iscrizione all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma al n. 15744 Ing. Fabrizio Cabas |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

File: IQ0101R09RIID0002002B.doc

n. Elab.:

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|--|---|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|---------|
| <p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>2 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 2 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 2 di 77 | | | | | | | | |

INDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | PREMESSA | 6 |
| 1.1 | RIFERIMENTI NORMATIVI | 7 |
| 2 | INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO | 8 |
| 2.1 | PERICOLOSITA' IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO | 9 |
| 2.2 | OBIETTIVI DELLO STUDIO..... | 10 |
| 2.2.1 | CRITERI DI VERIFICA DELLA COMPATIBILITÀ IDRAULICA DELLE OPERE DI ATTRAVERSAMENTO | 14 |
| 3 | ANALISI IDRAULICHE DISPONIBILI NELL'AREA DI STUDIO..... | 16 |
| 4 | STUDIO IDRAULICO..... | 17 |
| 4.1 | GENERALITÀ | 17 |
| 4.2 | DATI DI BASE | 17 |
| 4.2.1 | DATI TOPOGRAFICI | 17 |
| 4.2.2 | OPERE DI ATTRAVERSAMENTO ESISTENTI E IN PROGETTO | 19 |
| 4.2.3 | DATI IDROLOGICO-IDRAULICI | 23 |
| 4.3 | IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI | 28 |
| 4.3.1 | MODELLO BIDIMENSIONALE (2D)..... | 28 |
| 4.3.2 | MODELLO MONODIMENSIONALE (1D)..... | 39 |
| 4.4 | SIMULAZIONI NUMERICHE DELLE ONDE DI PIENA | 42 |
| 4.4.1 | MODELLO NUMERICO 2D..... | 42 |
| 4.4.2 | MODELLO NUMERICO 1D..... | 52 |
| 5 | VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO | 60 |
| 6 | VERIFICA ALLO SCALZAMENTO | 62 |
| 7 | OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA | 70 |
| 8 | CONSIDERAZIONI SUGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI..... | 72 |
| 9 | COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO..... | 74 |
| 10 | BIBLIOGRAFIA | 77 |

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 3 di 77 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|---|----|
| FIGURA 1: INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA DI STUDIO (NOTA: IL SISTEMA DI RIFERIMENTO ADOTTATO PER LE COORDINATE INDICATE NELLE MAPPE PRESENTATE NEL PRESENTE RAPPORTO È GAUSS-BOAGA FUSO OVEST. | 8 |
| FIGURA 2: ESTRATTO DELLE MAPPE DI PERICOLOSITÀ E DI RISCHIO DEL PIANO DI GESTIONE RISCHIO ALLUVIONI (PGRA) DELLA REGIONE PIEMONTE | 11 |
| FIGURA 3: INFORMAZIONI TOPOGRAFICHE A DISPOSIZIONE | 18 |
| FIGURA 4: OPERE DI ATTRAVERSAMENTO NELL'AREA DI STUDIO | 19 |
| FIGURA 5: TORRENTE CURONE: OPERA FS DI ATTRAVERSAMENTO ESISTENTE..... | 20 |
| FIGURA 6: TORRENTE CURONE: PIANTE DELL'OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN PROGETTO..... | 21 |
| FIGURA 7: TORRENTE CURONE: SEZIONE/PROSPETTO DELL'OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN PROGETTO. | 21 |
| FIGURA 8: TORRENTE LIMBIONE: OPERA FS DI ATTRAVERSAMENTO ESISTENTE | 22 |
| FIGURA 9: TORRENTE LIMBIONE: PIANTE DELL'OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN PROGETTO | 22 |
| FIGURA 10: TORRENTE LIMBIONE: SEZIONE/PROSPETTO DELL'OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN PROGETTO | 23 |
| FIGURA 11: TORRENTE CURONE: IDROGRAMMI DI PIENA – METODO GUMBEL | 24 |
| FIGURA 12: TORRENTE CURONE: IDROGRAMMI DI PIENA – METODO GEV | 24 |
| FIGURA 13: TORRENTE LIMBIONE: IDROGRAMMI DI PIENA – METODO GUMBEL | 25 |
| FIGURA 14: TORRENTE LIMBIONE: IDROGRAMMI DI PIENA – METODO GEV | 25 |
| FIGURA 15: CORINE LAND COVER PER L'AREA DI STUDIO..... | 26 |
| FIGURA 16: VALORI DEL COEFFICIENTE DI SCABREZZA IN TERMINI DI COEFFICIENTE DI MANNING ($s\ m^{-1/3}$) PER LE CLASSI CARATTERISTICHE DEL CLC..... | 27 |
| FIGURA 17: ESTRATTO DEL DTM DA LIDAR (A) E DEL DTM OTTENUTO INTEGRANDO IL LIDAR CON LE SEZIONI TRASVERSALI (B), LUNGO IL TORRENTE LIMBIONE, A MONTE DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO | 29 |
| FIGURA 18: ESTENSIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO E PARTICOLARE DELLA MESH IN PROSSIMITÀ DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO DEL TORRENTE CURONE | 30 |
| FIGURA 19: ESTENSIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO E PARTICOLARE DELLA MESH IN PROSSIMITÀ DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO DEL TORRENTE LIMBIONE..... | 31 |
| FIGURA 20: ESEMPIO DI DEM A SINISTRA ESTRAZIONE DEI PROFILI LUNGO I CONFINI DELLE CELLE, A DESTRA CURVA LIVELLO-VOLUME INVASATO..... | 32 |
| FIGURA 21: STRUTTURE INSERITE NEL MODELLO | 33 |
| FIGURA 22: TORRENTE CURONE – DETTAGLIO DELLA GRIGLIA DI CALCOLO IN CORRISPONDENZA DELL'ATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA FS..... | 34 |
| FIGURA 23: TORRENTE CURONE – ATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA FS, PARTICOLARE DELLA SCHEATIZZAZIONE DI UNA DELLE QUATTRO LUCI..... | 35 |
| FIGURA 24: TORRENTE LIMBIONE – DETTAGLIO DELLA GRIGLIA DI CALCOLO IN CORRISPONDENZA DELL'ATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA FS..... | 35 |

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|--|---|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|---------|
| <p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>4 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 4 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 4 di 77 | | | | | | | | |

| | |
|--|----|
| FIGURA 25: TORRENTE LIMBIONE – ATTRAVERSAMENTO DELLA LINEA FS..... | 36 |
| FIGURA 26: CONDIZIONI AL CONTORNO IMPOSTE AL MODELLO..... | 37 |
| FIGURA 27: CONFRONTO TRA AREE ALLAGABILI CALCOLATE CON QUELLE DEFINITE DAL PGRA PER Tr 200 ANNI..... | 39 |
| FIGURA 28: MODELLO 1D PER IL TORRENTE CURONE..... | 41 |
| FIGURA 29: MODELLO 1D PER IL TORRENTE LIMBIONE | 41 |
| FIGURA 30: MODELLO 2D “T. CURONE-T. LIMBIONE”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 50 ANNI, ANTE OPERAM | 43 |
| FIGURA 31: MODELLO 2D “T. CURONE-T. LIMBIONE”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 200 ANNI, ANTE OPERAM | 44 |
| FIGURA 32: MODELLO 2D “T. CURONE-T. LIMBIONE”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 500 ANNI, ANTE OPERAM | 45 |
| FIGURA 33: TORRENTE CURONE – LIVELLI IDRICI NELLA SEZIONE A MONTE DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ESISTENTE, SCENARIO ANTE OPERAM..... | 45 |
| FIGURA 34: TORRENTE LIMBIONE – LIVELLI IDRICI NELLA SEZIONE A MONTE DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO ESISTENTE, SCENARIO ANTE OPERAM..... | 46 |
| FIGURA 35: PARTICOLARE DELLA MESH POST OPERAM IN PROSSIMITÀ DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO DEL TORRENTE CURONE..... | 47 |
| FIGURA 36: PARTICOLARE DELLA MESH POST OPERAM IN PROSSIMITÀ DELL’ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO DEL TORRENTE LIMBIONE | 47 |
| FIGURA 37: MODELLO 2D “T. CURONE-T. LIMBIONE”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 50 ANNI, POST OPERAM..... | 48 |
| FIGURA 38: MODELLO 2D “T. CURONE-T. LIMBIONE”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 200 ANNI, POST OPERAM | 49 |
| FIGURA 39: MODELLO 2D “T. CURONE-T. LIMBIONE”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 500 ANNI, POST OPERAM | 50 |
| FIGURA 40: MODELLO 2D “T. CURONE-T. LIMBIONE”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 200 ANNI, IN CORRISPONDENZA DELL’ATTRAVERSAMENTO DEL TORRENTE CURONE, NELLE SITUAZIONI ANTE OPERAM (A SINISTRA) E POST OPERAM (A DESTRA) | 50 |
| FIGURA 41: MODELLO 2D “T. CURONE-T. LIMBIONE”: AREE POTENZIALMENTE INONDABILI, Tr = 200 ANNI, IN CORRISPONDENZA DELL’ATTRAVERSAMENTO DEL TORRENTE LIMBIONE, NELLE SITUAZIONI ANTE OPERAM (A SINISTRA) E POST OPERAM (A DESTRA) | 51 |
| FIGURA 42: MODELLO 1D “T. CURONE”: LIVELLI IDRICI (PORTATA IDROLOGICA TR200) IN CORRISPONDENZA DEL VIADOTTO VI09, POST OPERAM | 53 |
| FIGURA 43: MODELLO 1D “T. LIMBIONE”: LIVELLI IDRICI (PORTATA IDROLOGICA TR200) IN CORRISPONDENZA DEL VIADOTTO VI10, POST OPERAM | 54 |
| FIGURA 44: T. CURONE: CURVA DI DURATA DELLE PORTATE (FONTE: ARPA PIEMONTE). | 55 |
| FIGURA 45: T. CURONE: SCHEMATIZZAZIONE DELLE FASI DI CANTIERE | 57 |

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 5 di 77 |

FIGURA 46: T. CURONE, SEZIONE LUNGO L'ASSE DEL TRACCIATO FERROVIARIO: FASE DI CANTIERE 1, LIVELLO IDRICO ATTESO IN ALVEO IN PRESENZA DELLE OPERE PROVVISORIALI 58

FIGURA 47: T. CURONE, SEZIONE LUNGO L'ASSE DEL TRACCIATO FERROVIARIO: FASE DI CANTIERE 2, LIVELLO IDRICO ATTESO IN ALVEO IN PRESENZA DELLE OPERE PROVVISORIALI 58

FIGURA 48: MODELLO 2D "TORRENTE CURONE": MAPPA DEI VETTORI VELOCITÀ (Tr200) IN CORRISPONDENZA DEL VI09. 61

FIGURA 49: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI PILE NON UNIFORMI DOTATE DI FONDAZIONI. 65

FIGURA 50: CALCOLO DELLO SCALZAMENTO IN CORRISPONDENZA DELLE SPALLE: DEFINIZIONE DEI PARAMETRI. 67

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1 - CLASSI DI PERICOLOSITÀ IDRAULICA (P.G.R.A. – AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO)..... 10

TABELLA 2 - LIVELLI MASSIMI A MONTE DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO PER TEMPO DI RITORNO 52

TABELLA 3 – VIADOTTO VI09 (TORRENTE CURONE): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO. 60

TABELLA 4 – VIADOTTO VI10 (TORRENTE LIMBIONE): VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO..... 60

TABELLA 5 – VIADOTTO IV02: VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO. 60

TABELLA 6- FORMULAZIONE CSU: VALORI DEI FATTORI CORRETTIVI K1, K2, K3. 63

TABELLA 7- VIADOTTO VI09 (TORRENTE CURONE): VALORI DI SCALZAMENTO ATTESI ATTORNO ALLE PILE, PER Tr200. 66

TABELLA 8- VIADOTTO VI09 (TORRENTE CURONE): VALORI DI SCALZAMENTO ATTESI ATTORNO AL SISTEMA "PILA-FONDAZIONE", PER Tr200. 67

TABELLA 9- OPERA IV02: VALORI DI SCALZAMENTO MASSIMO ATTESI ATTORNO ALLE PILE, PER Tr200. 69

TABELLA 10- OPERA IV02: VALORI DI SCALZAMENTO MASSIMO ATTESI ATTORNO AL SISTEMA "PILA-FONDAZIONE", PER Tr200..... 69

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 6 di 77 |

1 PREMESSA

Il presente studio idraulico è stato redatto nell'ambito del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica dell'intervento di *Quadruplicamento della linea ferroviaria Tortona - Voghera*.

La tratta in oggetto si sviluppa per una lunghezza complessiva di 16.2 km nell'ambito territoriale delle province di Alessandria e Pavia. L'intervento ha origine dalle curve di ingresso della stazione di Tortona lato Ovest (Alessandria, Arquata S.) e termina nei pressi della radice lato Tortona della stazione di Voghera. L'intervento prevede *i*) la messa a PRG della stazione di Tortona; *ii*) il quadruplicamento in affiancamento ai binari della linea Tortona – Voghera; *iii*) la sistemazione della fermata di Pontecurone. La linea ferroviaria attraversa i corsi d'acqua maggiori denominati *Torrente Grue* (alla progr. 59+110 circa), *Torrente Calvenza* (alla progr. 60+430 circa), *Torrente Curone* (alla progr. 64+380 circa) e *Torrente Limbione* (alla progr. 65+525 circa), per lo scavalco dei quali si prevede la realizzazione dei viadotti VI06, VI07, VI09, VI10, rispettivamente. Inoltre, la linea ferroviaria attraversa anche una serie di rivi minori e scoli in corrispondenza dei quali si prevede la realizzazione di manufatti minori/tombini idraulici.

Nella presente relazione sono analizzati nel dettaglio i corsi d'acqua *Torrente Curone* e *Torrente Limbione*. Lo studio idraulico in oggetto ha lo scopo quindi di definire le aree potenzialmente inondabili associate alle esondazioni delle piene di riferimento (con tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni) dei corsi d'acqua *Torrente Curone* e *Torrente Limbione*, nonché i rispettivi tiranti idrici e le velocità della corrente in corrispondenza delle sezioni di attraversamento, nonché lungo tutta la tratta ferroviaria oggetto di intervento. A tal scopo, si è proceduto all'implementazione di modelli numerici idraulici secondo approcci bidimensionali e monodimensionali, in regime di moto vario e permanente. Sono state definite opportune opere di protezione e sistemazione del fondo alveo e delle sponde in corrispondenza delle nuove opere di attraversamento (i.e. VI09). E' stato trattato anche il tema delle escavazioni in corrispondenza di pile/spalle interessate dalla piena di progetto (i.e. VI09).

Le analisi sono state condotte in conformità a quanto previsto nell'ambito del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (P.G.R.A.) dell'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po (aggiornamento 2019), nonché nelle Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC2018), e nella relativa circolare esplicativa n.7/2019, e nel Manuale di Progettazione Ferroviaria (RFI).

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 7 di 77 |

1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI

I principali riferimenti normativi per il presente progetto sono rappresentati dai seguenti strumenti di pianificazione:

- *Regio Decreto del 08/05/1904, n.368*
- *Regio Decreto del 25/07/1904 n.523*
- *Legge n. 183/1989, “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”*
- *D.M. del 14 febbraio 1997 “Direttive tecniche per l’individuazione e perimetrazione da parte delle Regioni a rischio idraulico”*
- *D.L. n. 180/1998 (Decreto Sarno)*
- *Legge n. 365/2000 “Conversione in legge, con modificazioni, del decreto legge 12 ottobre 2000, n. 279, recante interventi urgenti per le aree a rischio idrogeologico molto elevato ed in materia di protezione civile” (Legge Soverato)*
- *D.Lgs. n. 152/2006 “Norma in materia ambientale”*
- *D.Lgs. n. 49/2010 “Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi alluvioni”*
- *Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni (P.G.R.A.), Autorità di Bacino del Fiume Po, Regione Piemonte (aggiornamento 2019) e relative Norme Tecniche di Attuazione (NTA)*
- *Nuove Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC2018)*
- *Circolare del 21 gennaio 2019, n.7 del C.S.LL.PP, esplicativa delle NTC 2018*
- *Manuale di Progettazione delle opere ferroviarie (RFI, 2020)*

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|--|---|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|---------|
| <p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>8 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 8 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 8 di 77 | | | | | | | | |

2 INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

Come anticipato in premessa, il presente studio idraulico è stato redatto a supporto della progettazione del quadruplicamento linea ferroviaria Tortona-Voghera. L'area di studio è centrata sulle intersezioni tra la linea ferroviaria e i torrenti Curone e Limbione (tratta Pontecurone-Voghera). La mappa che segue illustra il tratto preso in esame per i corpi idrici oggetto di studio nel presente elaborato, in relazione al tracciato della linea ferroviaria.

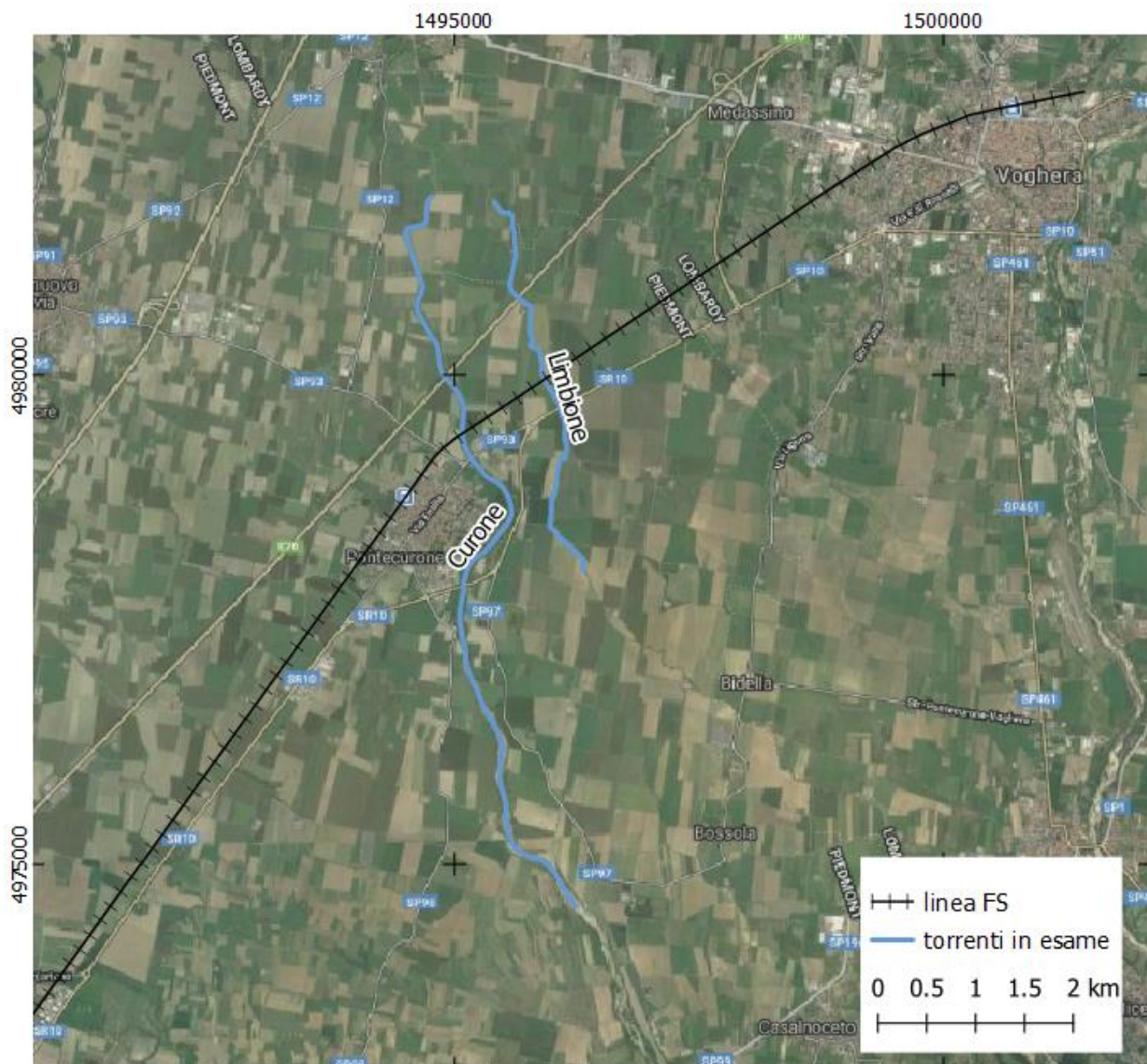


Figura 1: Inquadramento generale dell'area di studio (NOTA: il sistema di riferimento adottato per le coordinate indicate nelle mappe presentate nel presente rapporto è Gauss-Boaga Fuso Ovest).

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 9 di 77 |

2.1 PERICOLOSITA' IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO

Il quadro conoscitivo di riferimento per la caratterizzazione idrologica e idraulica dell'area di intervento e la definizione delle relative aree di pericolosità è attualmente riportata nel Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (P.G.R.A.) dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, introdotto dalla Direttiva europea 2007/60/CE (recepita nel diritto italiano con D.Lgs. 49/2010 per ogni distretto idrografico).

Lo scopo del PGRA è quello di orientare, nel modo più efficace, l'azione sulle aree a rischio significativo organizzate e gerarchizzate rispetto all'insieme di tutte le aree a rischio, definire gli obiettivi di sicurezza e le priorità di intervento a scala distrettuale, in modo concertato fra tutte le amministrazioni e gli enti gestori, con la partecipazione dei portatori di interesse e il coinvolgimento del pubblico in generale.

Per quanto riguarda l'area di intervento, il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) è stato adottato dall'autorità di Bacino del Po nella seduta di Comitato Istituzionale del 17 dicembre 2015, con deliberazione n.4/2015, ed è stato approvato nella seduta di Comitato Istituzionale del 3 marzo 2016, con deliberazione n.2/2016. Gli elaborati relativi alla Regione Piemonte, a cui si è fatto riferimento nel presente studio, sono stati recentemente aggiornati (2019), a seguito degli eventi alluvionali verificatesi nel 2014 e nel 2019.

Nello specifico, nell'ambito della pianificazione di bacino vigente sono individuate 3 classi di pericolosità idraulica (*P3 - elevata, P2 - media, P1 - scarsa*).

La classe di pericolosità elevata (*P3 – elevata probabilità di alluvioni, H = high*) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento $Tr \in 20 - 50$ anni (frequente).

La classe di pericolosità media (*P2 – media probabilità di alluvioni, M = medium*) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento $Tr \in 100 - 200$ anni (poco frequente).

La classe di pericolosità bassa (*P1 – scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi, L = low*) fa riferimento ad un evento di piena raro, caratterizzato da un tempo di ritorno Tr maggiore o uguale a 500 anni o al massimo storico registrato.

Di seguito, una tabella riepilogativa delle classi di pericolosità idraulica adottate.

| | | | | | | |
|--|---|-------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

Tabella 1 - Classi di pericolosità idraulica (P.G.R.A. – Autorità di Bacino del Fiume Po).

| <i>T_r</i> (anni) | <i>Pericolosità idraulica</i> |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 20-50 | P3 |
| 100-200 | P2 |
| ≥ 500 | P1 |

Come mostrato nella Figura 2, relativamente agli attraversamenti dei corsi d'acqua Torrente Curone e Torrente Limbione, la linea FS esistente e l'intervento di quadruplicamento in progetto sono interessati da aree a pericolosità idraulica *P3* (elevata probabilità di alluvioni), *P2* (media probabilità di alluvioni) e *P1* (scarsa probabilità di alluvioni), non soltanto limitatamente agli attraversamenti dei corsi d'acqua stessi, ma per un tratto di circa 2 km (dall'abitato di Pontecurone fino a poco prima dell'abitato di Brugna), così come indicato nelle mappe del P.G.R.A. della Regione Piemonte¹.

2.2 OBIETTIVI DELLO STUDIO

L'obiettivo principale dello studio è quello di valutare allo stato attuale e allo stato di progetto i processi idrodinamici che caratterizzano gli eventi estremi relativi al Torrente Curone e al Torrente Limbione, in particolare all'intersezione con la linea ferroviaria, e poter correttamente identificare e dimensionare i manufatti e le opere di sistemazione idraulica necessarie al fine di garantire l'efficienza degli attraversamenti dei torrenti in esame, anche durante gli eventi idrologici estremi.

L'obiettivo sopra riportato è stato raggiunto articolando lo studio secondo le seguenti attività principali, descritte nella presente relazione:

- studio delle normative di riferimento;
- reperimento di analisi idrauliche esistenti nell'area di studio;

¹http://visregppa.territorio.csi.it/visregppa/?printEnabled=true&ricercaTopoEnabled=true&lang=it&topic=DIFESA%20SUOLO&bgLayer=1&layer_s=Limiti amministrativi comunali20171020145903623_Scenari di alluvioni Pericolosita 201920200709124046443

|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>11 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 11 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 11 di 77 | | | | | | | | |

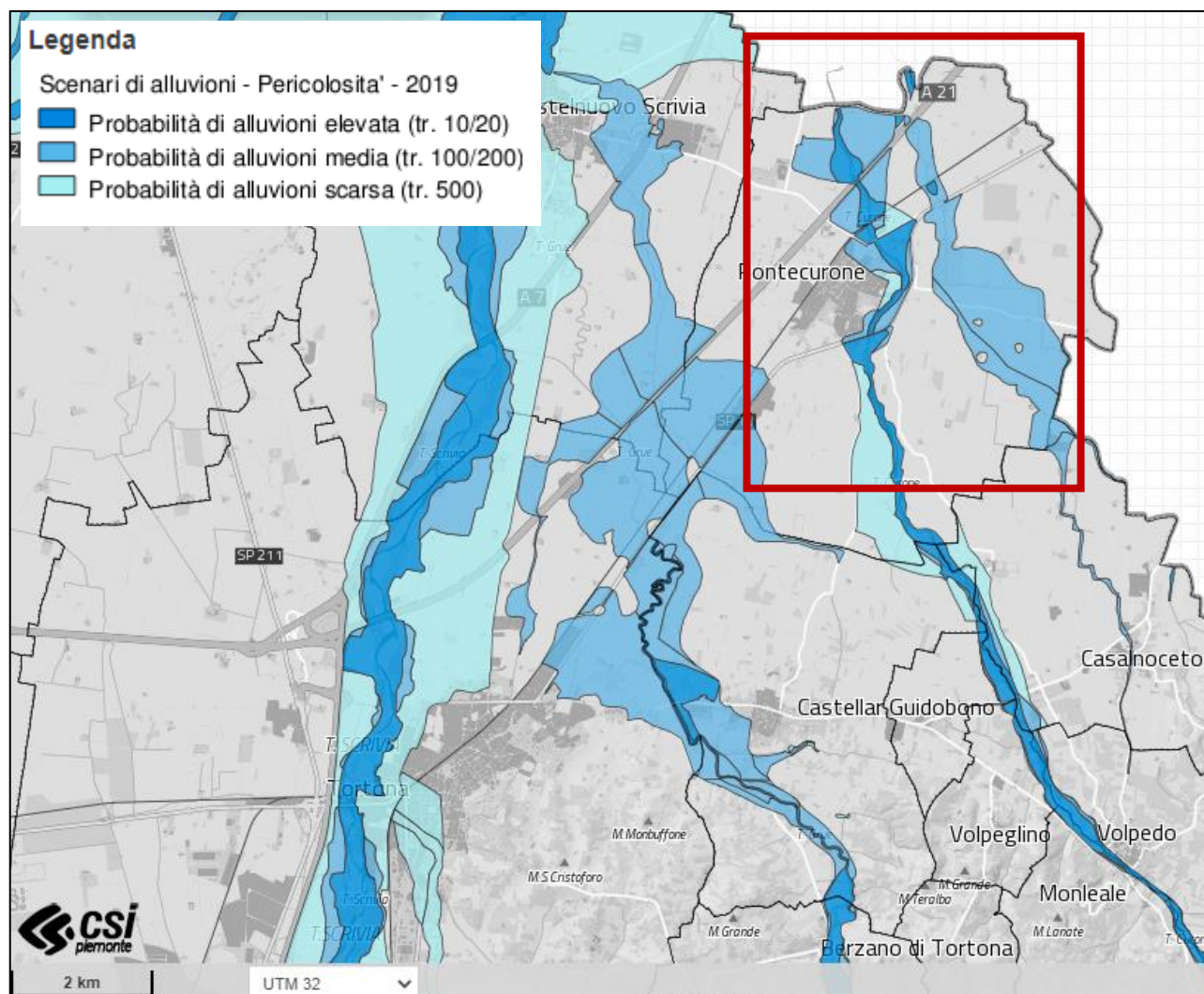


Figura 2: Estratto delle mappe di pericolosità e di rischio del Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA) della Regione Piemonte

- implementazione di un modello numerico bidimensionale per l'analisi ante operam e post operam;
- implementazione di modelli numerici monodimensionali con esondazioni impedito al fine di verificare il comportamento dei manufatti previsti nell'ipotesi di transito della cosiddetta portata idrologica;
- identificazione delle opere di sistemazione idraulica.

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 12 di 77 |

Per la sicurezza idraulica della linea ferroviaria nel suo complesso, le opere d'arte di attraversamento devono osservare le prescrizioni del Manuale di Progettazione Ferroviaria RFI (MdP, 2020), nonché le indicazioni riportate nelle NTC2018 (normativa di riferimento del presente progetto) e nella relativa circolare esplicativa n. 7 del 21 gennaio 2019.

In sintesi, con riferimento al MdP RFI, le opere idrauliche di attraversamento devono essere verificate per eventi di massima piena caratterizzati da un tempo di ritorno di **200 anni**. Relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena, si specifica quanto segue:

- il franco idraulico tra la quota di intradosso del manufatto ed il livello idrico corrispondente alla piena di progetto (**Tr = 200 anni**) non deve essere inferiore a **1.5 m** nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento;
- il franco minimo tra la quota di intradosso del manufatto e la quota di carico idraulico totale (**Tr = 200 anni**) deve essere almeno pari a **50 cm**.

Inoltre, nel caso di rilevati vulnerabili per esondazione di corsi d'acqua, *“dovrà essere garantito un franco non inferiore a 1 m tra la quota della piattaforma ferroviaria (piano di regolamento) e la massima altezza raggiungibile dalla quota di massima piena di progetto; le scarpate dovranno essere protette da apposite opere di difesa progettate sulla base dei parametri indicati nei piani di bacino o negli studi idraulici di progetto.”*

Con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018), l'opera deve rispondere ai seguenti requisiti:

“..... Deve in ogni caso essere definita una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno Tr pari a 200 anni ($Tr=200$).....Il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d'acqua interessata dalla piena di progetto e, se arginata, i corpi arginali. Qualora fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce netta minima tra pile contigue, o fra pila e spalla del ponte, non deve essere inferiore a 40 m misurati ortogonalmente al filone principale della corrente. Nel caso di pile e/o spalle in alveo, cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni e alla protezione delle fondazioni

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 13 di 77 |

delle pile e delle spalle tenuto anche conto del materiale galleggiante che il corso d'acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione. Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l'intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1,50 m, e comunque dovrà essere scelto tenendo conto di considerazioni e previsioni sul trasporto solido di fondo e sul trasporto di materiale galleggiante, garantendo una adeguata distanza fra l'intradosso delle strutture e il fondo alveo. Quando l'intradosso delle strutture non sia costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale di 2/3 della luce, e comunque non inferiore a 40 m.”

Nella relativa circolare applicativa n.7 del 21 gennaio 2019, si asserisce inoltre:

“Quando, per caratteristiche del territorio e del corso d'acqua, si possa verificare nella sezione oggetto dell'attraversamento il transito di tronchi di rilevanti dimensioni, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50 m, e da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia indicativamente non inferiore a $6 \div 7$ m. Nel caso di corsi di acqua arginati, la quota di sottotrave sarà comunque non inferiore alla quota della sommità arginale per l'intera luce. Per tutti gli attraversamenti è opportuno che sia garantito il transito dei mezzi di manutenzione delle sponde e/o delle arginature.”

Con riferimento alle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) dell'Autorità di Bacino del Fiume Po (26 aprile 2001), ri-adottate nell'ambito del P.G.R.A. attualmente vigente:

Art. 38. Interventi per la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico

- 1. Fatto salvo quanto previsto agli artt. 29 e 30, all'interno delle Fasce A e B è consentita la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico, riferite a servizi essenziali non altrimenti localizzabili, a condizione che non modifichino i fenomeni idraulici naturali e le caratteristiche di particolare rilevanza naturale dell'ecosistema fluviale che possono aver luogo nelle fasce, che non costituiscano significativo ostacolo al deflusso e non limitino in modo significativo la capacità di invaso, e che non concorrano ad incrementare il carico*

| | | | | | | |
|--|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 14 di 77 |

insediativo. A tal fine i progetti devono essere corredati da uno studio di compatibilità, che documenti l'assenza dei suddetti fenomeni e delle eventuali modifiche alle suddette caratteristiche, da sottoporre all'Autorità competente, così come individuata dalla direttiva di cui al comma successivo, per l'espressione di parere rispetto la pianificazione di bacino.

2. *L'Autorità di bacino emana ed aggiorna direttive concernenti i criteri, gli indirizzi e le prescrizioni tecniche relative alla predisposizione degli studi di compatibilità e alla individuazione degli interventi a maggiore criticità in termini d'impatto sull'assetto della rete idrografica. Per questi ultimi il parere di cui al comma 1 sarà espresso dalla stessa Autorità di bacino.*
3. *Le nuove opere di attraversamento, stradale o ferroviario, e comunque delle infrastrutture a rete, devono essere progettate nel rispetto dei criteri e delle prescrizioni tecniche per la verifica idraulica di cui ad apposita direttiva emanata dall'Autorità di bacino.*

In definitiva, in accordo al MdP e alle NTC2018, nonché alle indicazioni riportate nelle NTA del P.A.I. o del P.G.R.A. dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, è stato sviluppato lo studio di compatibilità idraulica delle nuove opere di attraversamento previste in progetto sui corsi d'acqua Torrente Curone e Torrente Limbione, nonché della linea ferroviaria in progetto nel suo complesso, tramite simulazioni numeriche idrauliche della propagazione delle piene per i tempi di ritorno di **50, 200 e 500 anni.**

2.2.1 Criteri di verifica della compatibilità idraulica delle opere di attraversamento

In relazione alla rassegna delle normative vigenti in materia di compatibilità idraulica riportata in precedenza, ai risultati dello studio idrologico annesso (rif. IQ0101R09ID0001001A), nonché alle indicazioni di *Regione Piemonte*, alla quale sono state sottoposte preliminarmente le valutazioni idrologiche e idrauliche sviluppate nell'ambito del presente progetto e di cui si riporta in allegato alla relazione cod. IQ0101R09ID0002001A la relativa nota di riscontro (o *parere preventivo*), sono stati adottati i seguenti criteri di analisi e verifica:

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 15 di 77 |

- adozione delle portate al colmo e dei rispettivi idrogrammi di piena di riferimento (con $Tr = 200$ anni) derivanti dall'applicazione di LSPP elaborate secondo la distribuzione di probabilità di Gumbel per la calibrazione (in termini di scabrezza) dei modelli numerici bidimensionali (in regime di moto vario) sviluppati sulla base degli studi idraulici (e dei relativi risultati in termini di aree di esondazione) disponibili sul territorio (descritti nel paragrafo successivo)
- adozione delle portate al colmo e dei rispettivi idrogrammi di piena di riferimento (con $Tr = 200$ anni) derivanti dall'applicazione di LSPP elaborate secondo la distribuzione di probabilità GEV per la determinazione, mediante modello numerico bidimensionale (2D, in regime di moto vario), delle aree potenzialmente inondabili di "progetto"
- adozione delle portate al colmo di riferimento derivanti dall'applicazione di LSPP elaborate secondo la distribuzione di probabilità di Gumbel (in analogia agli studi sviluppati sul territorio) per la determinazione dei livelli idrici di progetto (con $Tr = 200$ anni) in corrispondenza delle opere di attraversamento principali (i.e. VI06, VI07), mediante modelli numerici monodimensionali (1D), in regime di moto permanente, nell'ipotesi di transito della cosiddetta "portata idrologica" (i.e. non "laminata" per effetto delle esondazioni a monte della sezione di attraversamento di interesse) a seguito di eventuali futuri interventi di sistemazione/protezione idraulica (alcuni già in corso di attuazione sul territorio, come descritto nel paragrafo successivo)

Nello specifico, il franco idraulico minimo di 1,5 m in corrispondenza delle opere di attraversamento dovrà essere garantito con riferimento ai livelli idrici associati alla piena con tempo di ritorno di 200 anni (stimata sulla base delle LSPP elaborate mediante Gumbel), derivanti dalle simulazioni numeriche secondo modello monodimensionale (1D), in regime di moto permanente.

La sicurezza idraulica della linea ferroviaria nel suo complesso dovrà essere valutata con riferimento alle aree potenzialmente inondabili associate all'esondazione della piena con tempo di ritorno di 200 anni (stimata sulla base delle LSPP elaborate mediante GEV), nonché dei corrispondenti livelli idrici, derivanti dalle simulazioni numeriche secondo modello bidimensionale (2D), in regime di moto vario.

| | | | | | | |
|---|--|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 16 di 77 |

3 ANALISI IDRAULICHE DISPONIBILI NELL'AREA DI STUDIO

Le analisi idrauliche disponibili nell'area di studio per il *Torrente Curone* e il *Torrente Limbione* includono le indicazioni fornite dalla normativa vigente in tema di rischio idraulico già citate in precedenza, in particolare dalla pianificazione di bacino vigente (P.A.I. e/o P.G.R.A. dell'Autorità di Bacino del Fiume Po).

Per il *Torrente Curone*, è disponibile anche uno studio idraulico svolto da Anselmo Associati per conto della *Comunità Montana Terre del Giarolo*, che riguarda il tratto fluviale tra gli abitati di Fabbrica Curone e Monleale, circa 10 km a monte del tratto fluviale di interesse per il presente studio.

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 17 di 77 |

4 STUDIO IDRAULICO

4.1 GENERALITÀ

Lo studio idraulico è stato basato sull'implementazione di modelli numerici atti a rappresentare le dinamiche idrauliche durante gli eventi di piena dei torrenti in fase di studio. L'approccio metodologico seguito è partito dall'integrazione ed elaborazione di dati di base, fondamentalmente di natura topografica per poter correttamente implementare la geometria del sistema. Una volta elaborata la base topografica è stato possibile sviluppare un modello idraulico con il software HEC-RAS² (ver.5.0.7), con schema puramente bidimensionale. La taratura dei modelli è stata effettuata in riferimento a quanto riportato nel PGRA. Gli scenari analizzati comprendono lo stato *ante operam* e quello *post operam*. Infine, è stato implementato anche un modello idraulico HEC-RAS monodimensionale con esondazioni impedito per ciascun torrente, al fine di verificare la compatibilità idraulica dei manufatti/delle opere in progetto.

4.2 DATI DI BASE

I dati di base utilizzati per lo sviluppo dello studio idraulico includono:

- Dati topografici;
- Informazioni sulle opere di attraversamento esistenti e in progetto;
- Dati idrologico-idraulici.

4.2.1 Dati topografici

I dati topografici utilizzati per la ricostruzione della geometria del sistema comprendono diverse tipologie di informazione, proveniente da fonti differenti:

- Rilievo delle sezioni trasversali dei torrenti, nonché delle relative opere di attraversamento esistenti, effettuato nel 2020: sono state rilevate 40 sezioni sul Torrente Curone e 28 sezioni lungo il Torrente Limbione;

²<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| <p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>18 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 18 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 18 di 77 | | | | | | | | |

- Rilievo Lidar dell'area di studio ad alta risoluzione (50 punti a metro quadrato) eseguito da Italferr nel 2020;
- Rilievo topografico 2D e 3D lungo la fascia del tracciato della linea ferroviaria, effettuato nel 2020;
- Modello Digitale del Terreno della Regione Piemonte con risoluzione a 5 m, derivato da Lidar del 2009-2011.

La Figura 3 fornisce la mappa con il dettaglio dell'estensione delle informazioni topografiche a disposizione.

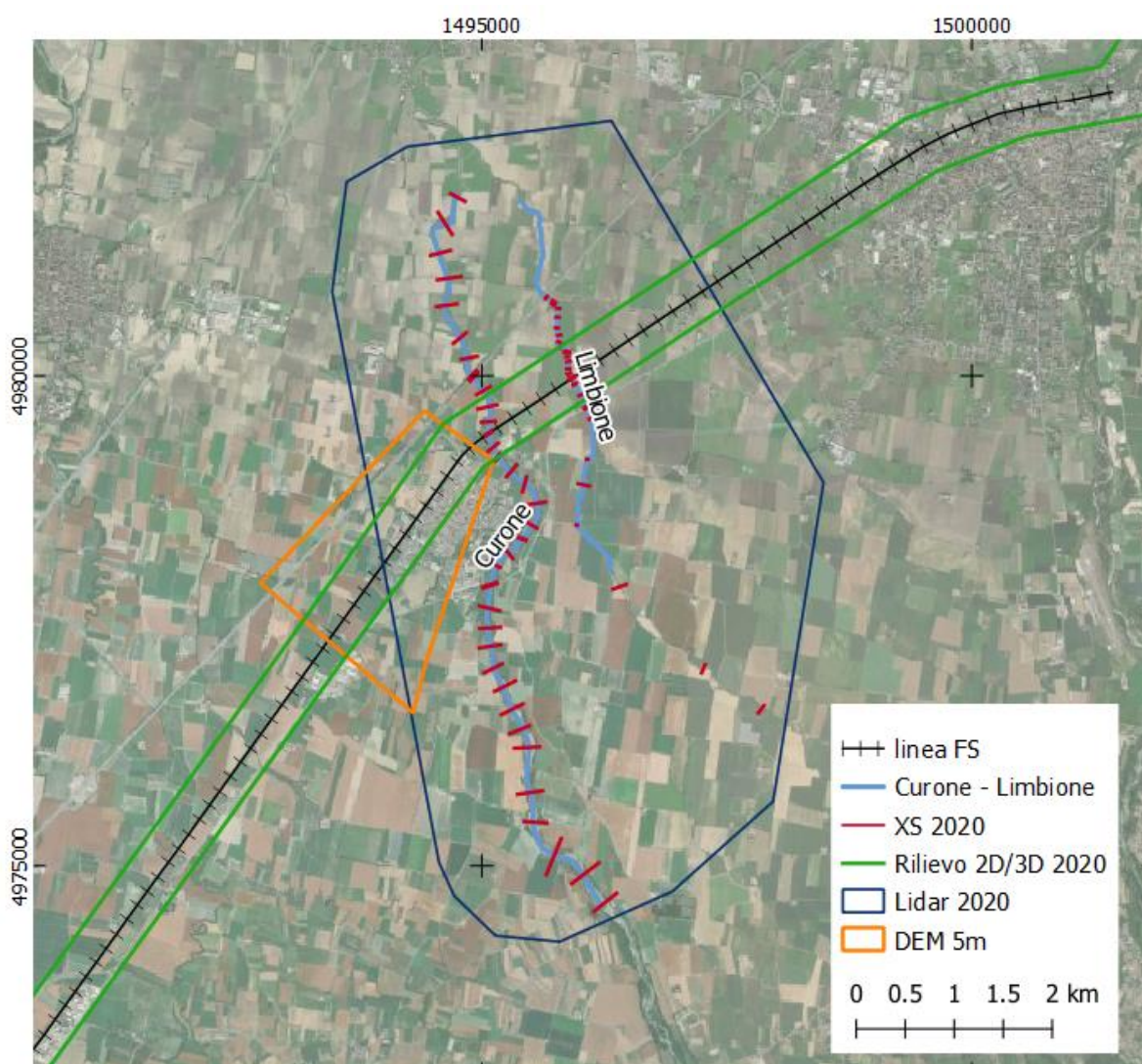



Figura 3: Informazioni topografiche a disposizione

|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>19 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 19 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 19 di 77 | | | | | | | | |

4.2.2 Opere di attraversamento esistenti e in progetto

Le informazioni geometriche relative alle opere di attraversamento esistenti lungo i due torrenti sono state desunte dalla campagna di indagini topografiche effettuata nel 2020.

Per gli altri manufatti presenti nell'area di studio, fondamentalmente le opere idrauliche minori localizzate lungo la linea ferroviaria, le informazioni sono state ricavate dal rilievo 3D, integrato con dati puntuali raccolti in campo.

La configurazione dello scenario di progetto è stata poi utilizzata per la definizione delle geometrie degli attraversamenti in progetto.

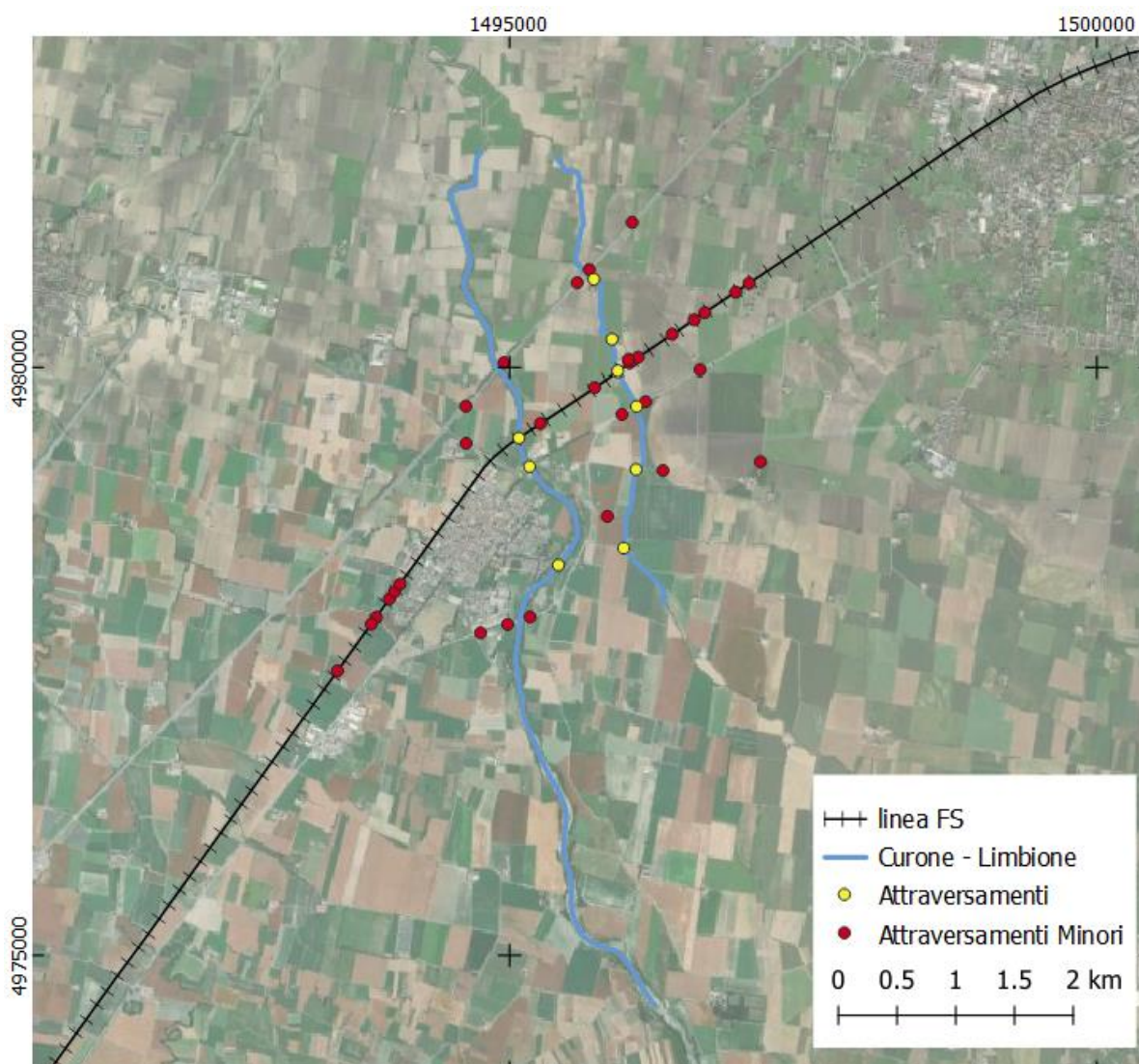


Figura 4: Opere di attraversamento nell'area di studio

| | | | | | | |
|--|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 20 di 77 |

Relativamente all'opera di attraversamento esistente sul Torrente Curone, l'attuale linea ferroviaria scavalca il corso d'acqua mediante un ponte in muratura, ad arco, a quattro campate, ognuna con luce di 12 metri circa, con quota di intradosso minima a +99.10 m slm (Figura 5).



Figura 5: Torrente Curone: opera FS di attraversamento esistente

Il progetto di quadruplicamento della linea ferroviaria Tortona-Voghera prevede in corrispondenza del T. Curone la realizzazione del nuovo viadotto VI09, in leggera variante, a valle della linea FS esistente.

Il viadotto VI09 è costituito di 6 campate con luce di 70 metri (nessuna ricade nell'alveo inciso del Torrente Curone) e quota minima di intradosso a +101.3 m slm.

In corrispondenza del VI09 si prevede anche la realizzazione di opportune opere di protezione di pile/spalle, al fine di inibire eventuali fenomeni di erosione, come meglio descritto nei capitoli/paragrafi seguenti.

IDROLOGIA E IDRAULICA

 Relazione idraulica - Studio idraulico
 bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 21 di 77 |

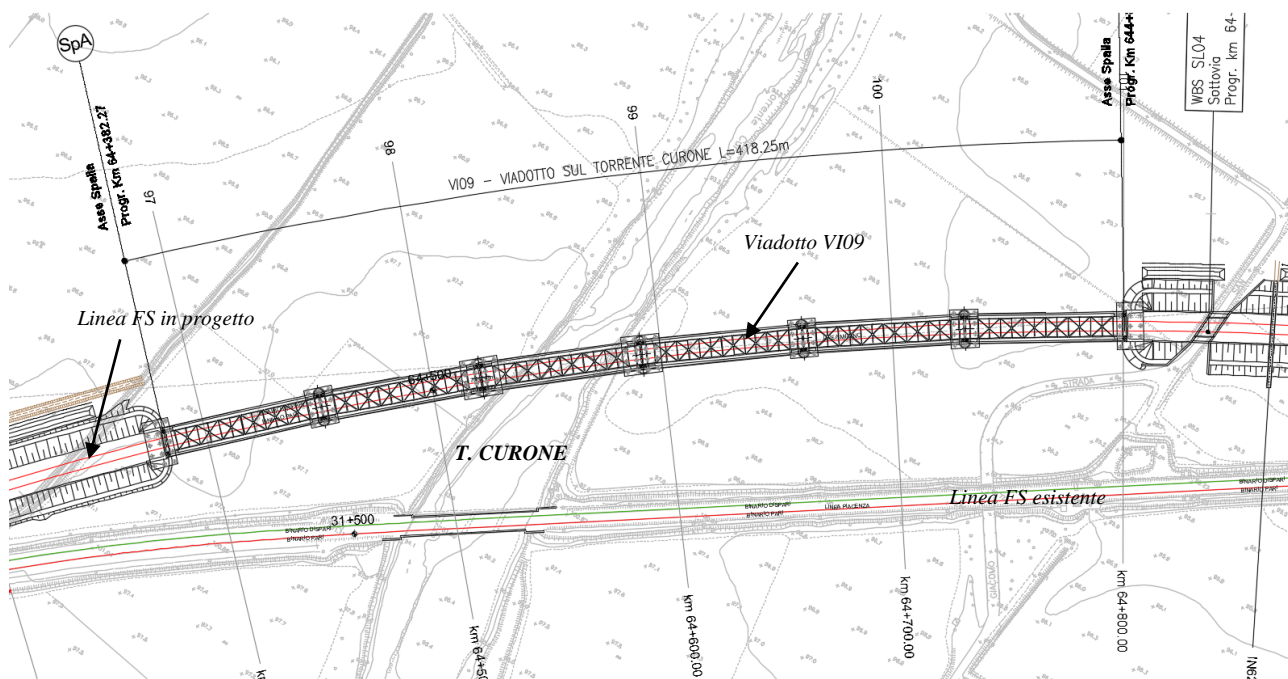


Figura 6: Torrente Curone: pianta dell'opera di attraversamento in progetto

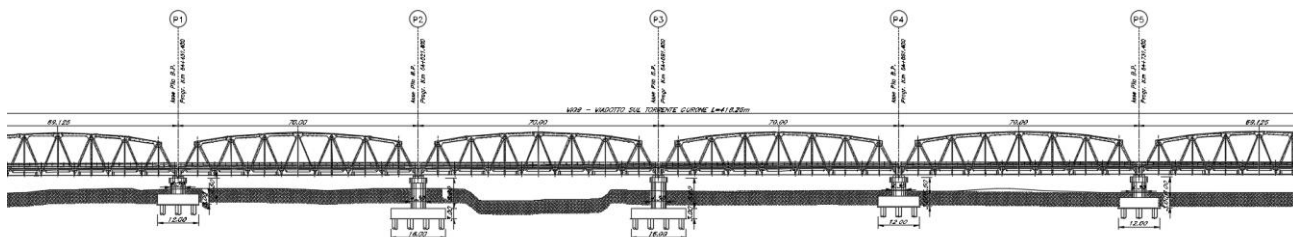


Figura 7: Torrente Curone: sezione/prospetto dell'opera di attraversamento in progetto.

Per quanto riguarda l'opera di attraversamento esistente sul Torrente Limbione, l'attuale linea ferroviaria scavalca il corso d'acqua mediante un manufatto in muratura, ad arco, con luce di 5 metri e altezza di 2.5 metri circa, con quota di intradosso a +94.60 m slm (Figura 8).

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
 bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 22 di 77 |



Figura 8: Torrente Limbione: opera FS di attraversamento esistente

La nuova opera di attraversamento (VI10) scavalca completamente il corso d'acqua (con luce di 18 metri) senza interferire con la sezione naturale di deflusso e le arginature esistenti. La quota minima di intradosso si attesta a +98.80 m slm.

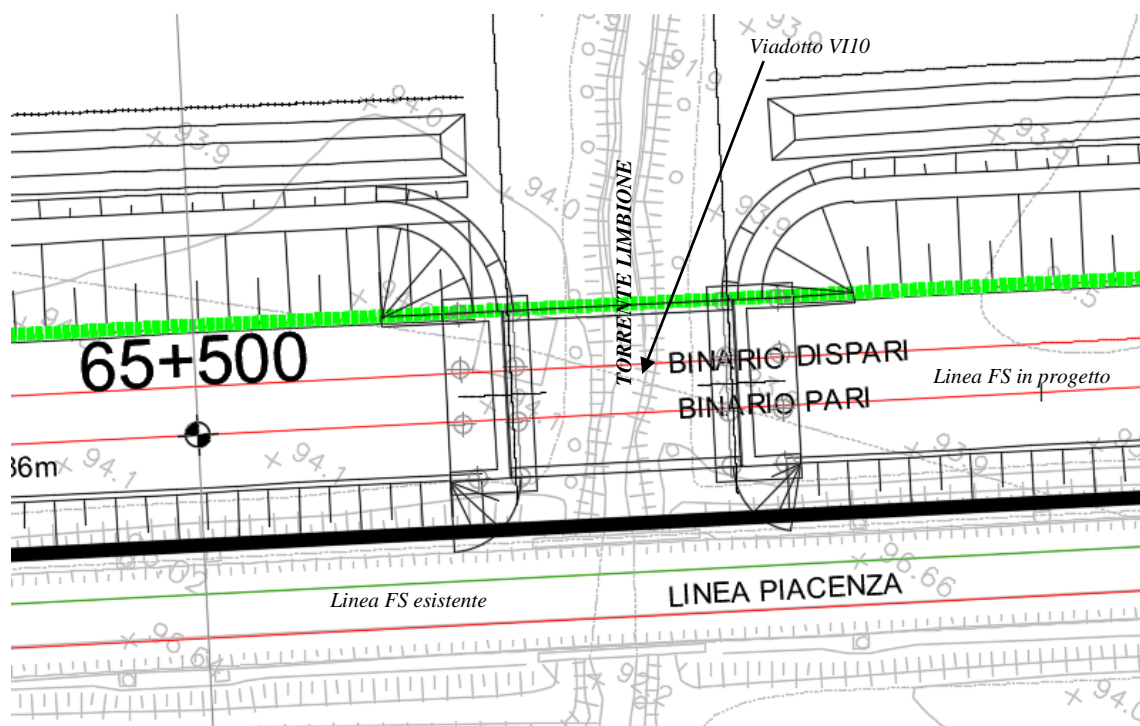



Figura 9: Torrente Limbione: pianta dell'opera di attraversamento in progetto

| | | | | | | |
|--|--|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | |
| <p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione</p> | <p>COMMESSA IQ01</p> | <p>LOTTO 01</p> | <p>CODIFICA R 09 RI</p> | <p>DOCUMENTO ID 0002 002</p> | <p>REV. B</p> | <p>FOGLIO 23 di 77</p> |

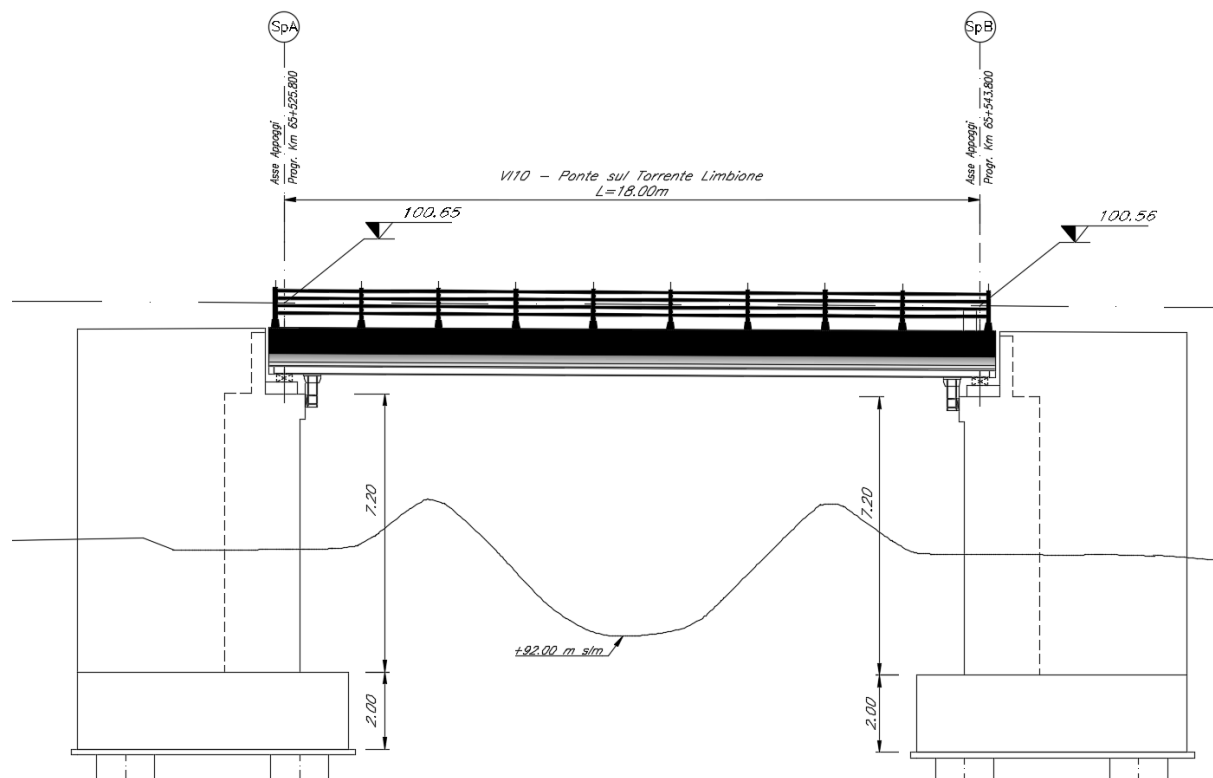


Figura 10: Torrente Limbione: sezione/prospetto dell'opera di attraversamento in progetto.

4.2.3 Dati idrologico-idraulici

Le informazioni di base di carattere idrologico-idraulico includono i dati utilizzati per la definizione delle condizioni al contorno dei modelli e per la loro calibrazione.

Per quanto riguarda l'idrologia, si è fatto riferimento alla *Relazione idrologica bacini maggiori - T. Grue, T. Calvenza, T. Curone, T. Limbione* (Cod. IQ0000D09RIID0001001A) redatta nell'ambito del presente Progetto Definitivo, che ha portato alla definizione degli idrogrammi di piena per assegnato tempo di ritorno immediatamente a monte dei tratti di asta analizzati. Tali idrogrammi sono stati determinati secondo diversi approcci statistici, sia secondo Gumbel sia secondo GEV, distribuzioni di probabilità comunemente accettate in letteratura nella valutazione degli eventi estremi. Gli idrogrammi ottenuti con il metodo GEV appaiono sicuramente più cautelativi, rispetto a quelli ottenuti con il metodo di Gumbel e sono stati utilizzati per l'implementazione dei modelli; tuttavia, gli idrogrammi Gumbel sono stati comunque presi come riferimento, specialmente per 200 anni di tempo di ritorno, idrogramma che è stato utilizzato per la calibrazione del modello.

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 24 di 77 |

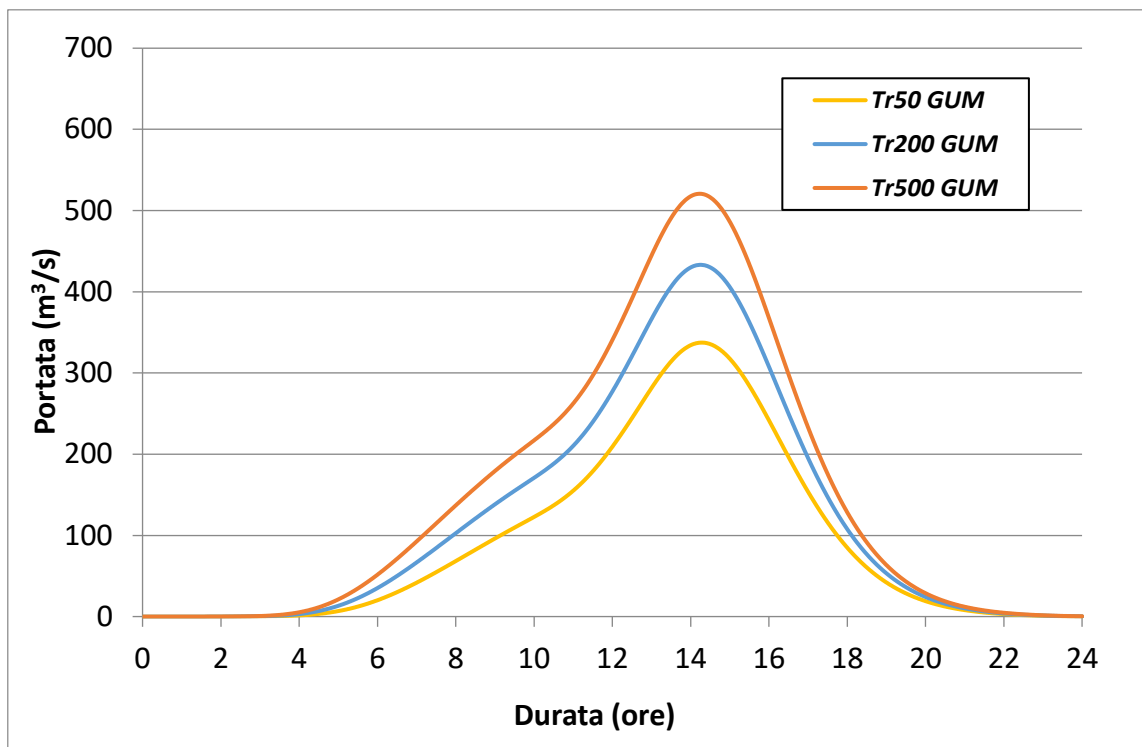


Figura 11: Torrente Curone: idrogrammi di piena – metodo Gumbel

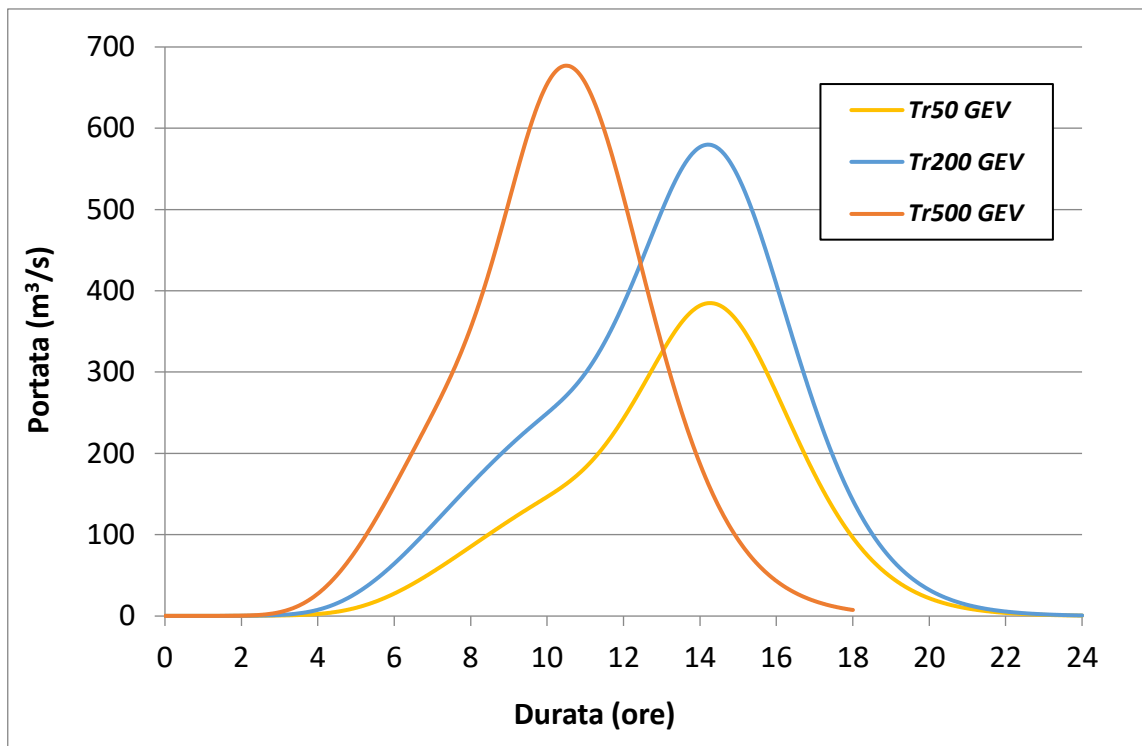


Figura 12: Torrente Curone: idrogrammi di piena – metodo GEV

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 25 di 77 |

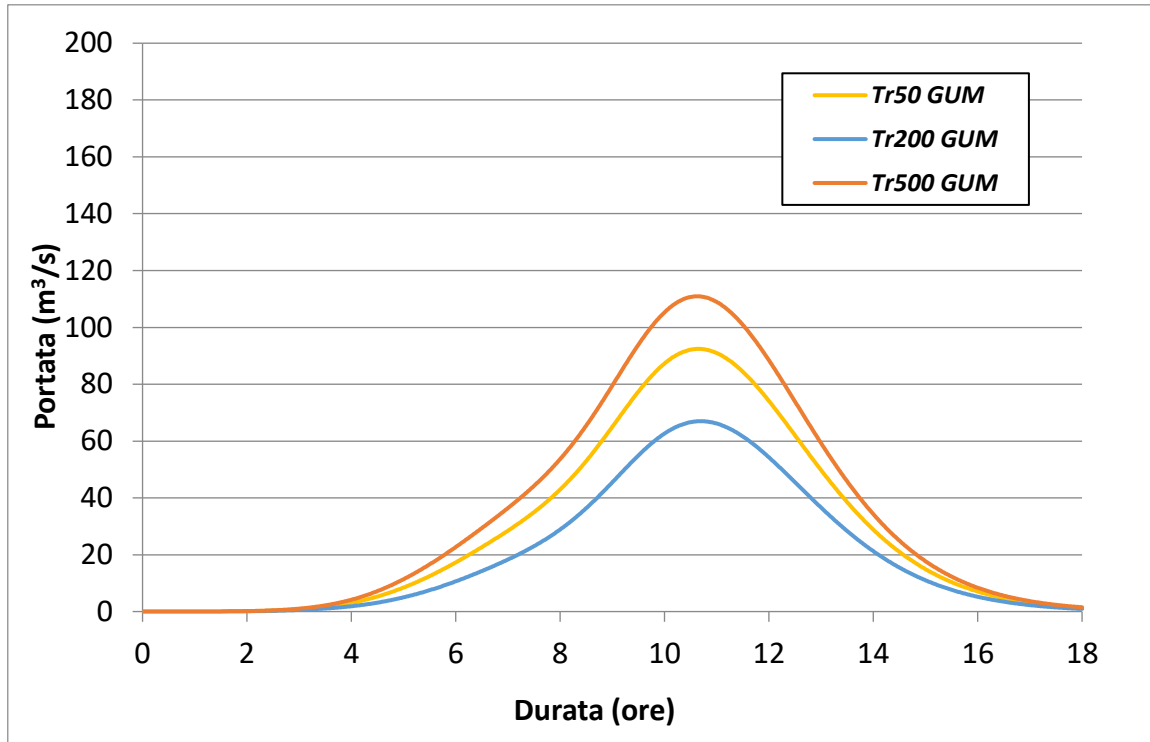


Figura 13: Torrente Limbione: idrogrammi di piena – metodo Gumbel

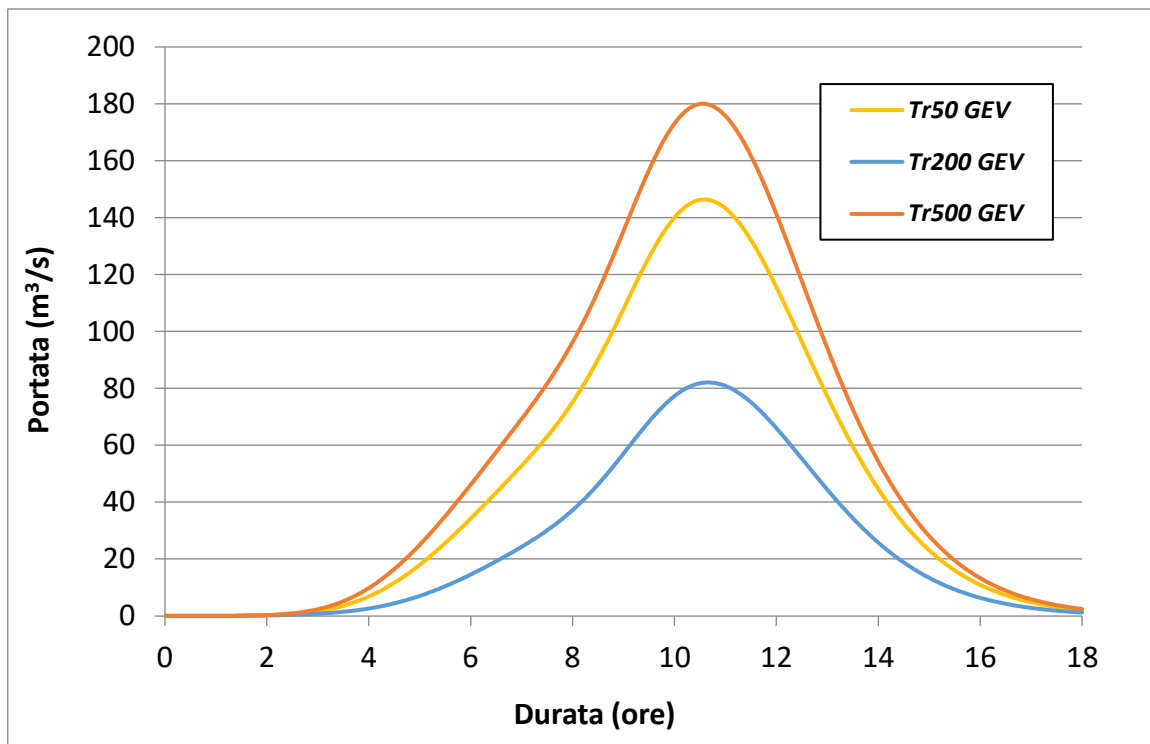


Figura 14: Torrente Limbione: idrogrammi di piena – metodo GEV

|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>26 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 26 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 26 di 77 | | | | | | | | |

Per quanto riguarda la caratterizzazione delle superfici delle aree di allagamento, a supporto dell'identificazione dei parametri di scabrezza per le zone esterne ai corsi d'acqua, è stato utilizzato il Corine Land Cover (CLC)³, standard europeo per il rilevamento e il monitoraggio delle caratteristiche di copertura e uso del territorio.

La tipologia di copertura del suolo è stata poi correlata ad un coefficiente di scabrezza direttamente implementabile in ambiente RAS, secondo quanto reperito in letteratura tecnica (Pestana et al., 2013) e riportato in Figura 16.

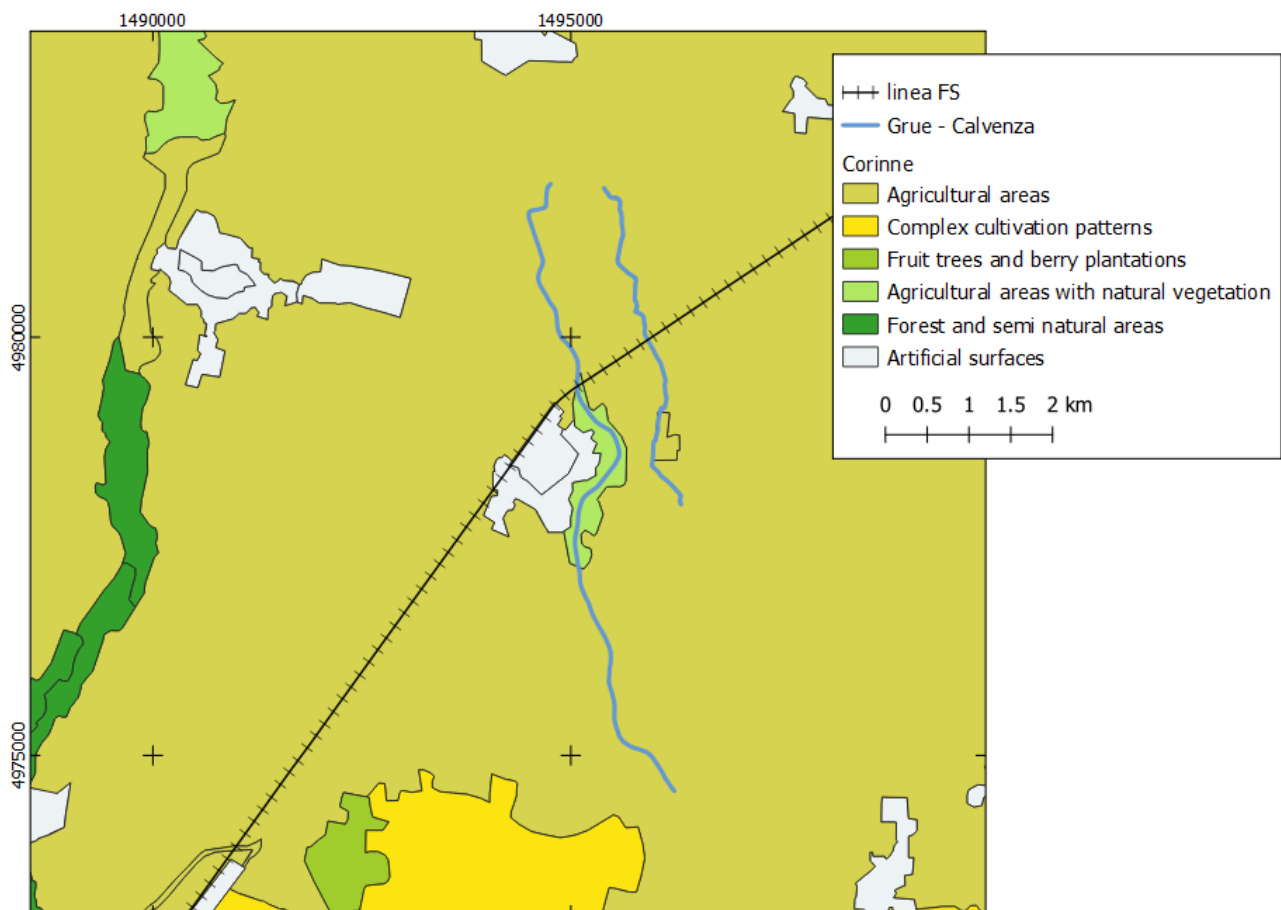


Figura 15: Corine Land Cover per l'area di studio

³<https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/biodiversita/documenti/corine-land-cover-clc#:~:text=Il%20progetto%20Corine%20Land%20Cover,alle%20esigenze%20di%20tutela%20ambientale>

| | | | | | | |
|---|---|-------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

Altra informazione utilizzata è costituita dalle mappe di pericolosità e di rischio del PGRA e dalla perimetrazione delle aree potenzialmente allagabili per assegnato tempo di ritorno, sopra descritte, usate anche esse (unitamente agli studi idraulici disponibili) come riferimento per la taratura dei modelli idraulici sviluppati.

| Code | Designation | n |
|------|---|-------|
| 111 | Continuos urban fabric | 0.230 |
| 112 | Discontinuous urban fabric | 0.115 |
| 121 | Industrial or commercial units | 0.230 |
| 122 | Roads and rail networks and associated land | 0.038 |
| 124 | Airports | 0.230 |
| 131 | Mineral extraction sites | 0.104 |
| 132 | Dump sites | 0.115 |
| 133 | Construction sites | 0.115 |
| 142 | Sport and leisure facilities | 0.023 |
| 211 | Non-irrigated arable land | 0.043 |
| 212 | Permanently irrigated land | 0.043 |
| 213 | Rice fields | 0.023 |
| 221 | Vineyards | 0.043 |
| 222 | Fruit trees and berry plantations | 0.043 |
| 223 | Olive groves | 0.043 |
| 231 | Pastures | 0.298 |
| 241 | Annual crops associated w/permanent crops | 0.043 |
| 242 | Complex cultivation patterns | 0.023 |
| 243 | Agriculture, w/significant natural vegetation | 0.058 |
| 244 | Agro-forestry areas | 0.058 |
| 311 | Broad-leaved forest | 0.230 |
| 312 | Coniferous forest | 0.127 |
| 313 | Mixed forest | 0.230 |
| 321 | Natural grasslands | 0.039 |
| 322 | Moors and heathland | 0.058 |
| 323 | Sclerophyllous vegetation | 0.058 |
| 324 | Transitional woodland-shrub | 0.058 |
| 331 | Beaches, dunes, sands | 0.138 |
| 332 | Bare rocks | 0.104 |
| 333 | Sparsely vegetated areas | 0.104 |
| 334 | Burnt areas | 0.104 |
| 411 | Inland marshes | 0.115 |
| 511 | Water courses | 0.035 |
| 512 | Water bodies | 0.035 |

Figura 16: Valori del coefficiente di scabrezza in termini di coefficiente di Manning ($s\ m^{-1/3}$) per le classi caratteristiche del CLC

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 28 di 77 |

4.3 IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI

4.3.1 Modello bidimensionale (2D)

4.3.1.1 Approccio matematico (2D)

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione dei modelli bidimensionali dei corsi d'acqua Torrente Curone e Torrente Limbione è il software Hec-Ras 5.0.7 sviluppato dall'Hydrologic Center del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America.

Le caratteristiche principali dell'algoritmo di modellazione 2D del software Hec Ras sono ben descritte nell'omologo paragrafo presente nella relazione annessa IQ0101R09RIID0002001A, al quale si rimanda per maggiori dettagli.

4.3.1.2 Generazione del Modello Digitale Del Terreno

Il primo passo per l'implementazione della geometria del modello prevede la definizione delle quote del terreno dell'alveo e della pianura alluvionale tramite la generazione di un Modello Digitale del Terreno (DTM). Tali informazioni sono state estratte dai dati topografici disponibili descritti nel paragrafo 4.2.1, avendo cura di integrare le informazioni derivate dalle sezioni trasversali rilevate in alveo con quelle relative al piano campagna provenienti dai modelli digitali del terreno.

Per tale scopo è stata effettuata una interpolazione geospaziale delle sezioni rilevate, in ambiente GIS tramite il software XS Interpolator⁴, in modo da poter prendere in considerazione le variazioni puntuali presenti tra due sezioni rilevate, siano esse dovute a restringimenti, allargamenti o cambiamenti di direzione del corso d'acqua; il risultato di tale interpolazione è costituito da un modello digitale dell'alveo, integrato con il Lidar per le quote del terreno di piano campagna.

La figura che segue fornisce un esempio dell'interpolazione effettuata, mostrando il confronto tra il rilievo Lidar e l'integrazione tra quest'ultimo e il modello digitale dell'alveo; in figura sono indicati anche i profili delle sezioni trasversali rilevate, per meglio apprezzare la ricostruzione della geometria in alveo. Di seguito, il particolare della geometria d'alveo ricostruita per il T. Limbione.

⁴<https://shop.m3eweb.com/home/32-xs-interpolator.html>

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 29 di 77 |



Figura 17: Estratto del DTM da Lidar (a) e del DTM ottenuto integrando il Lidar con le sezioni trasversali (b), lungo il torrente Limbione, a monte dell'attraversamento ferroviario

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 30 di 77 |

4.3.1.3 Definizione del dominio e della griglia di calcolo

Poiché appartenenti allo stesso bacino (del Torrente Curone), ovvero l'uno confluisce nell'altro (il T. Limbione è un tributario in destra idraulica del T. Curone), ed essendo interagenti in termini di aree inondate, è stato implementato un unico modello numerico bidimensionale che considera e simula la propagazione contemporanea delle piene del T. Curone e del T. Limbione. Per l'implementazione del modello si è in prima battuta identificato un dominio di calcolo che fosse coperto dalle informazioni topografiche disponibili e che fosse sufficientemente esteso a monte e a valle del nodo di interesse, in modo che il calcolo non risenta delle condizioni al contorno imposte. Particolare attenzione è stata posta sull'esigenza di includere all'interno dello stesso dominio di calcolo i due torrenti, al fine di poter correttamente prendere in considerazione potenziali interconnessioni tra i flussi di esondazione che possano poi gravare ulteriormente sull'officiosità degli attraversamenti in fase di studio.

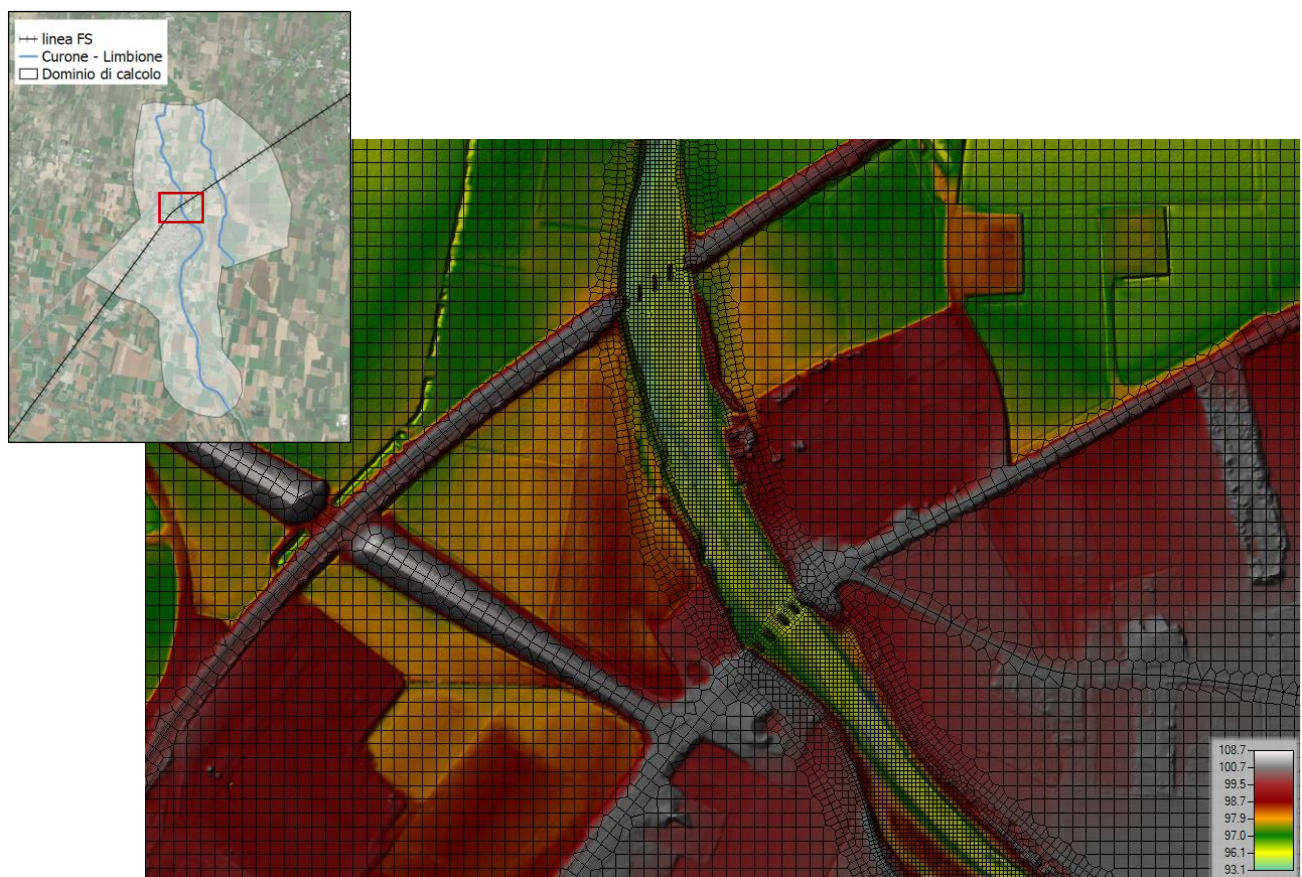


Figura 18: Estensione del dominio di calcolo e particolare della mesh in prossimità dell'attraversamento ferroviario del Torrente Curone

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 31 di 77 |

Per quanto riguarda la griglia di calcolo, HEC-RAS 2D utilizza uno schema di soluzioni a volumi finiti, che consente l'utilizzo di una griglia di calcolo (mesh) strutturata o non strutturata. Ciò significa che la mesh può essere costituita da celle di calcolo a 3 a 8 lati.

A partire dal modello digitale del terreno finale implementato come descritto sopra, è stata selezionata una risoluzione nominale della griglia pari a 10 m e sono stati utilizzati gli strumenti automatizzati all'interno di HEC-RAS per la costruzione della griglia di calcolo nel piano campagna, imponendo la posizione dei rilevati, in modo da adattare gli elementi della griglia ai principali ostacoli al deflusso.

In corrispondenza dei principali corsi d'acqua, la griglia è stata dettagliata maggiormente passando ad una risoluzione di 5 m per le fasce spondali, a 3 m per l'alveo inciso del Curone e a 1,5 m per l'alveo inciso del Limbione. La griglia così definita è costituita da 304'509 celle, di estensione media pari a 63.58 m², con una variazione da 0.93 m² a 277.40 m².

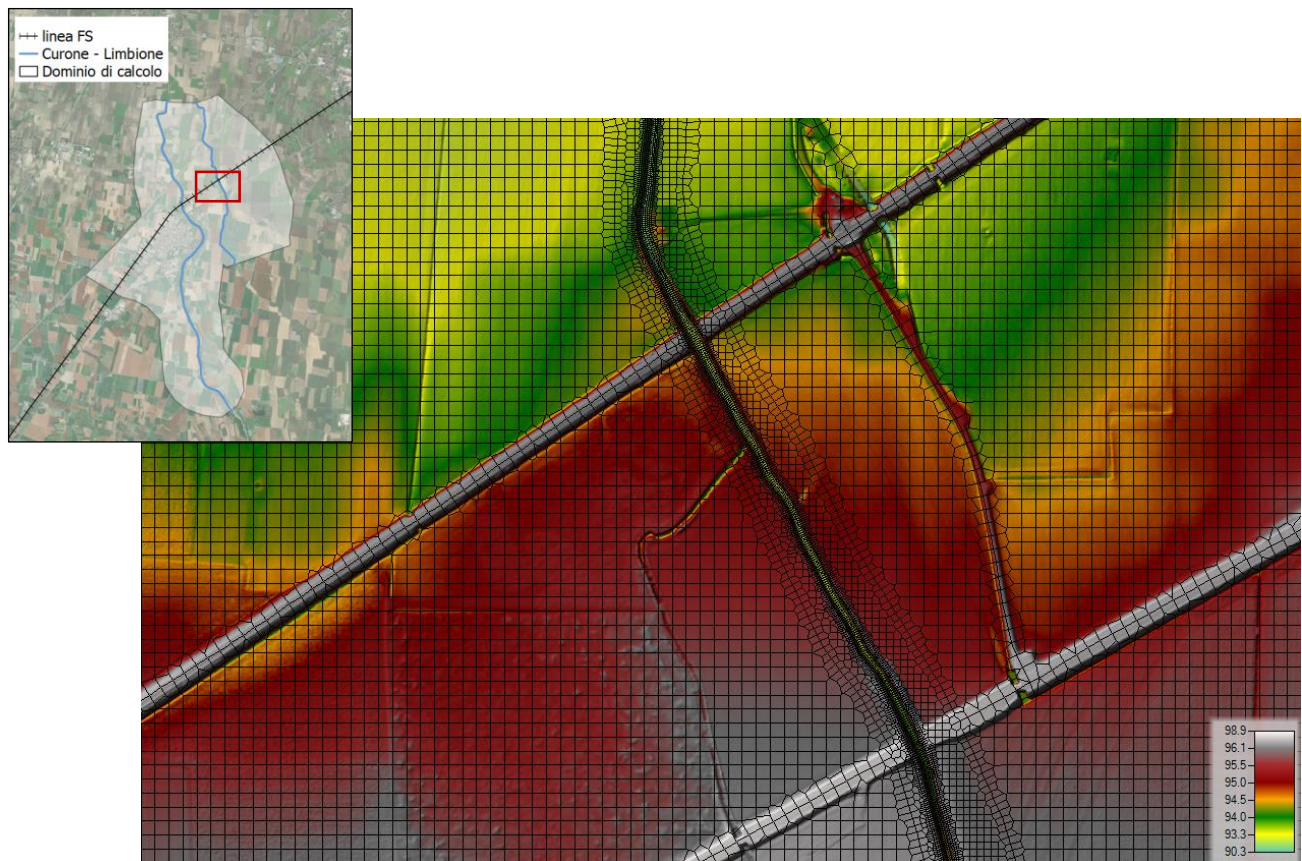


Figura 19: Estensione del dominio di calcolo e particolare della mesh in prossimità dell'attraversamento ferroviario del Torrente Limbione

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 32 di 77 |

La discretizzazione delle celle è stata ritenuta sufficientemente dettagliata per rappresentare la dinamica di allagamento; tuttavia, è opportuno considerare che, in realtà, il livello di dettaglio del modello HEC-RAS non dipende solo dalle dimensioni della cella. La specificità della modellazione in RAS 2D è legata al fatto che il software è in grado di considerare nel calcolo un'informazione topografica più dettagliata rispetto alla griglia di calcolo che utilizza. Questa prerogativa lo differenzia in maniera netta rispetto a tutti gli altri software di modellazione 2D, dove l'informazione topografica è al più sui nodi di calcolo.

Infatti, pur mantenendo un solo punto di calcolo all'interno di ogni cella della griglia e quindi calcolando un solo livello, il pre-processore del software per ogni cella determina, sulla base del DEM sotteso dalla cella:

- la relazione livello-volume invasato nella cella, che utilizza nella soluzione dell'equazione di continuità,
- la relazione livello area di deflusso per ogni contorno di scambio tra 2 celle, che utilizza nella soluzione dell'equazione del moto.

Questa tecnica permette quindi di considerare dettagli topografici non legati alla dimensione delle celle di calcolo, ma legati alla definizione del DEM di base.

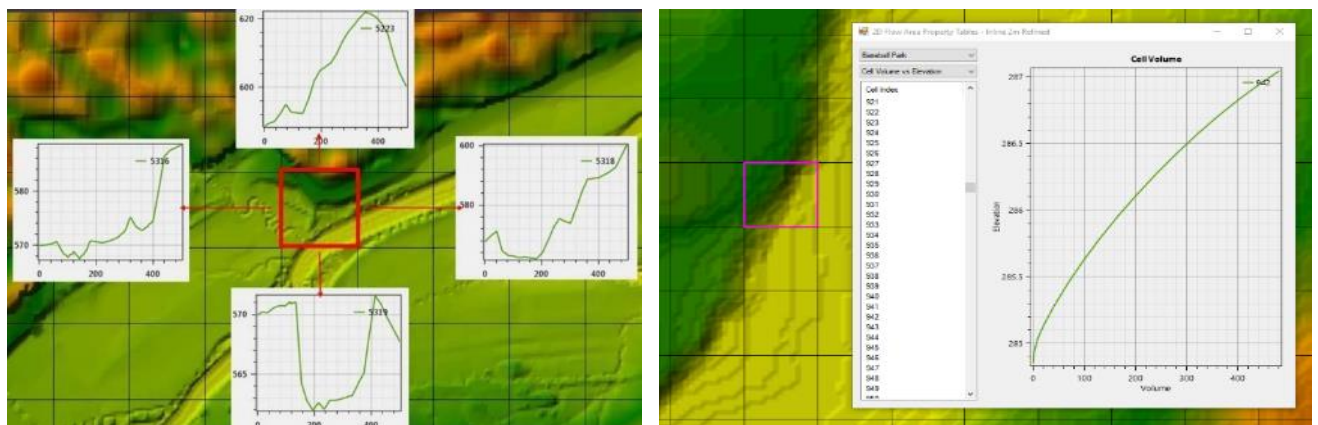


Figura 20: Esempio di DEM a sinistra estrazione dei profili lungo i confini delle celle, a destra curva livello-volume invasato

Anche il post-processore del software per identificare le aree allagate utilizza il DEM, quindi all'interno di una cella di calcolo considera allagati solo i pixel del DEM che hanno una quota inferiore a quella del livello idrico calcolato per la cella stessa.

|  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>33 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 33 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 33 di 77 | | | | | | | | |

4.3.1.4 Strutture idrauliche all'interno del modello

Tutte le strutture identificate nel paragrafo 4.2.2 sono state inserite nella geometria del modello come culvert, secondo le informazioni geometriche disponibili. In aggiunta a tutti i tombini e agli attraversamenti, sono poi stati inseriti anche i rilevati significativi presenti nel dominio di calcolo e che possono influire sulle dinamiche di allagamento; tali rilevati sono stati schematizzati come strutture di sfioro, alla quota definita dal modello del terreno oppure come breakline su cui è stata forzata la definizione delle celle di calcolo per appoggiare i nodi di calcolo sulla quota più elevata del rilevato.

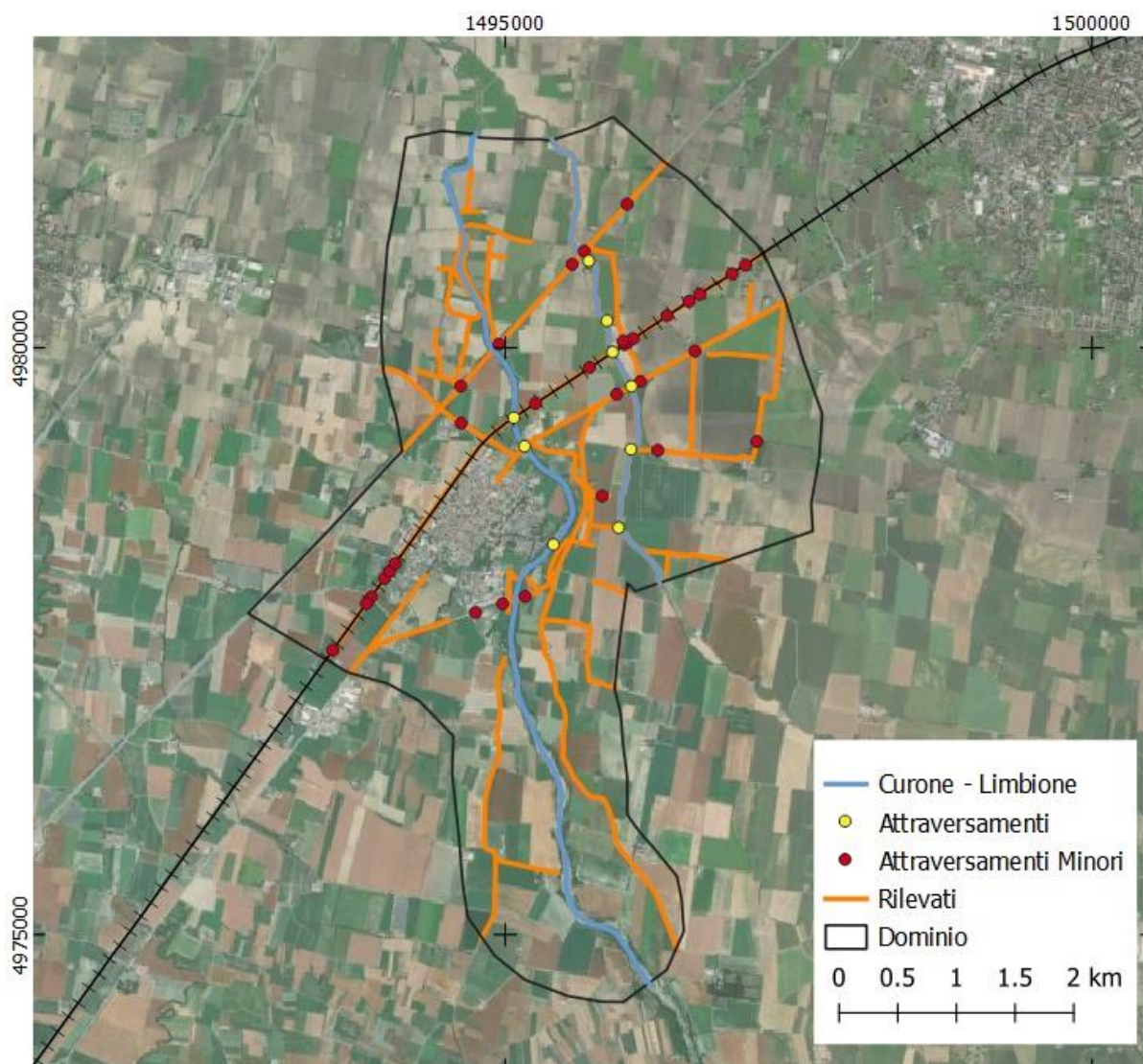


Figura 21: Strutture inserite nel modello

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 34 di 77 |

In particolare, per quanto riguarda gli attraversamenti della linea ferroviaria, allo stato attuale, le strutture sono state schematizzate come illustrato nelle figure seguenti, che riportano una vista planimetrica di dettaglio della griglia di calcolo nell'intorno delle strutture e la loro effettiva definizione nel modello, secondo quanto ricavato dal rilievo topografico.

L'attraversamento del Torrente Curone è stato schematizzato mediante quattro *culverts*, uno per ogni luce.

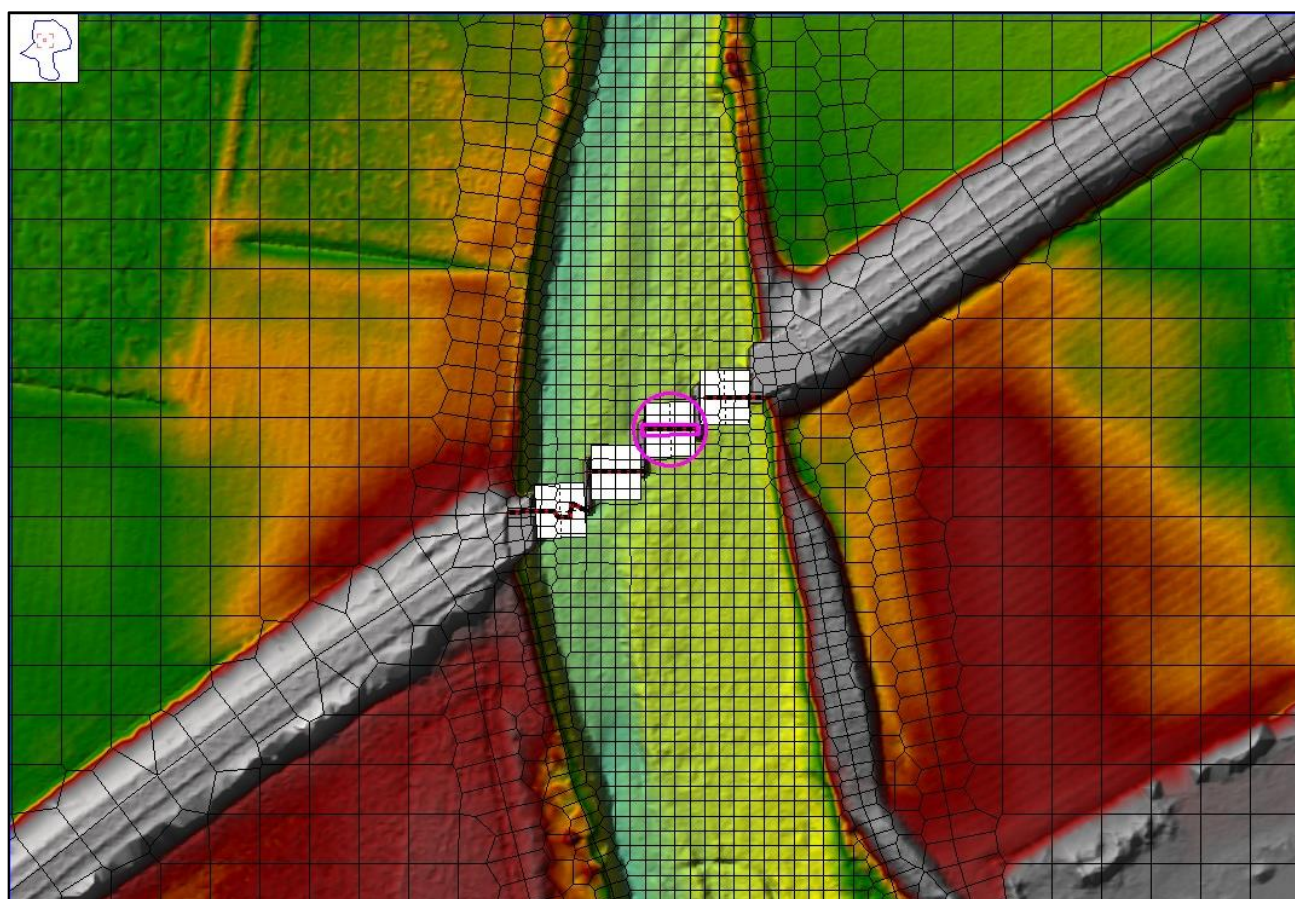


Figura 22: Torrente Curone – dettaglio della griglia di calcolo in corrispondenza dell'attraversamento della linea FS

IDROLOGIA E IDRAULICA

**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione**

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 35 di 77 |

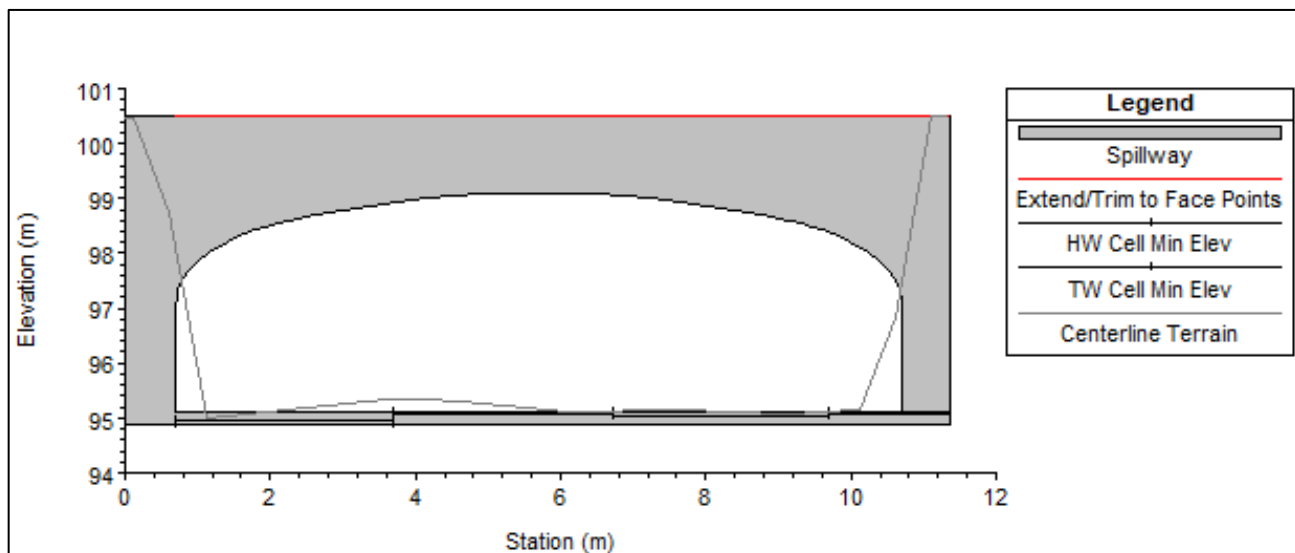


Figura 23: Torrente Curone – attraversamento della linea FS, particolare della scheatizzazione di una delle quattro luci

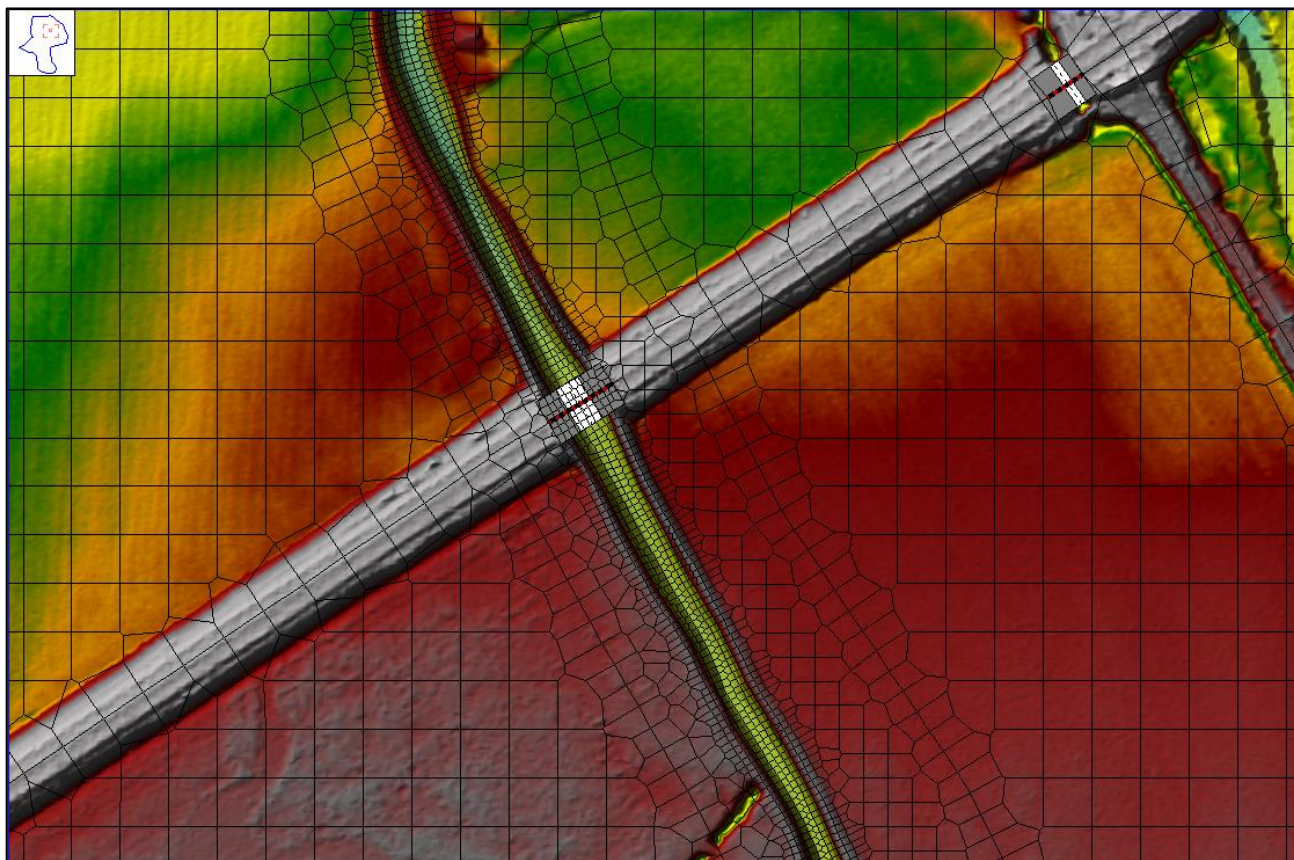


Figura 24: Torrente Limbione – dettaglio della griglia di calcolo in corrispondenza dell'attraversamento della linea FS

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| <p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>36 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 36 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 36 di 77 | | | | | | | | |

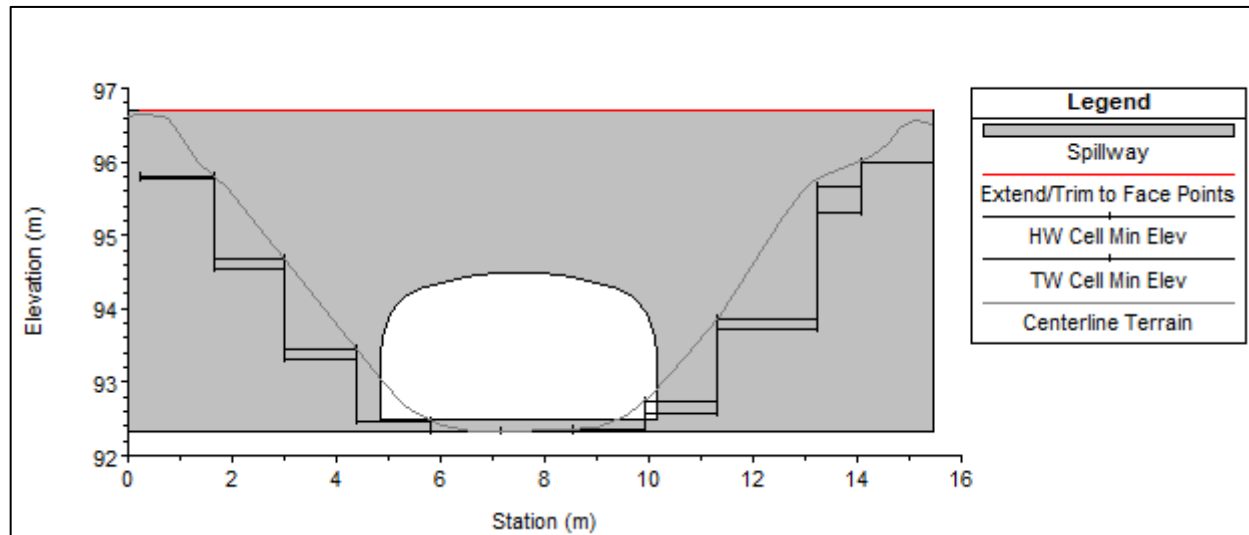


Figura 25: Torrente Limbione – attraversamento della linea FS

4.3.1.5 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno imposte al modello includono:

- idrogrammi in input a monte lungo il T. Curone e il T. Limbione;
- condizioni al contorno di valle lungo i contorni del dominio dove è previsto il passaggio di acqua attraverso il contorno del dominio: è stata imposta la condizione di *normal depth*, corrispondente ad una condizione di moto uniforme, localmente definita tramite il calcolo della pendenza del terreno.

La Figura 26 mostra la schematizzazione delle condizioni al contorno imposte.

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| <p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>37 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 37 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 37 di 77 | | | | | | | | |

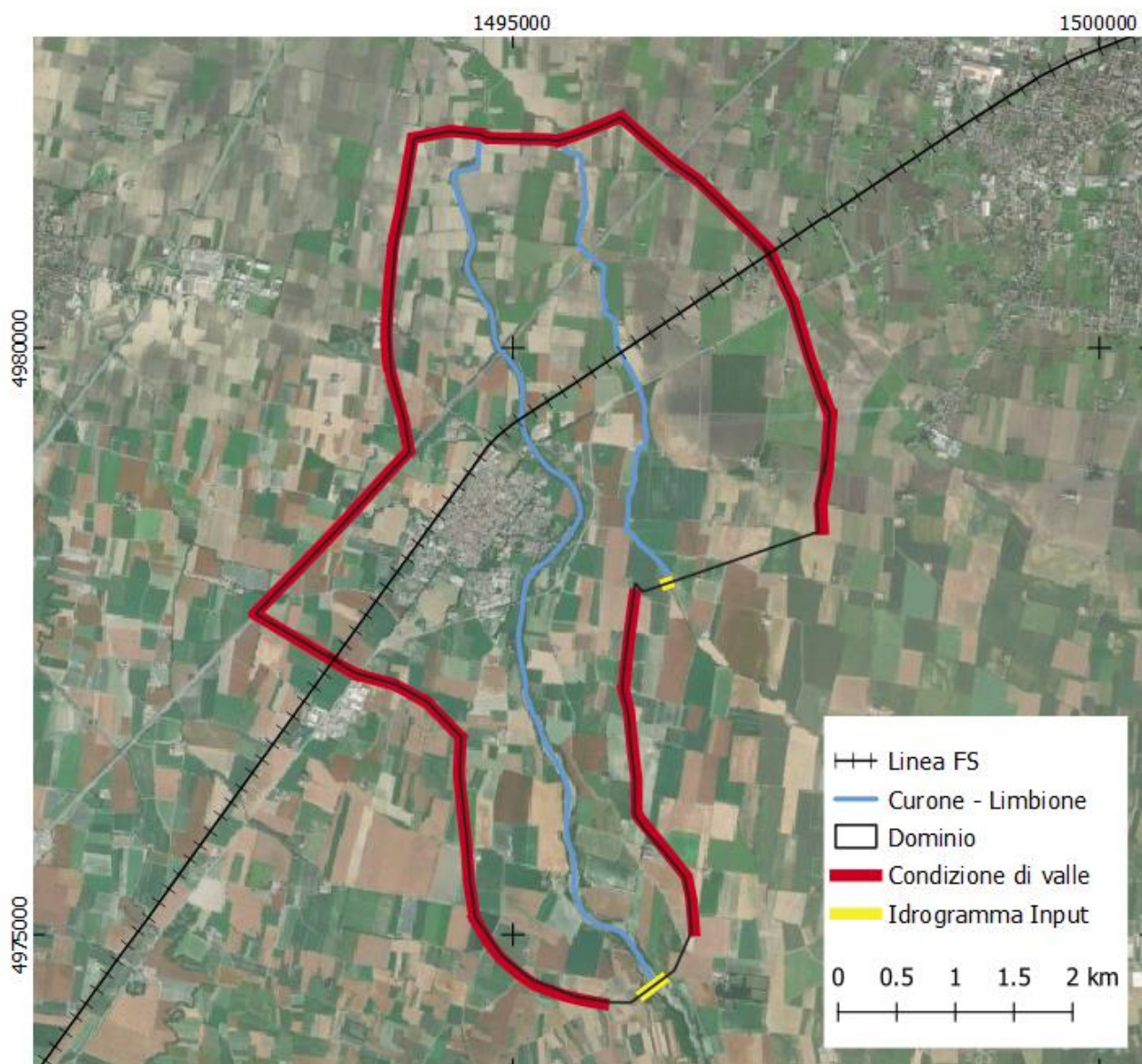


Figura 26: Condizioni al contorno imposte al modello

4.3.1.6 Calibrazione

Non essendo disponibili informazioni relative a misurazioni idrometriche durante eventi specifici per entrambi i torrenti in fase di studio, si è potuto calibrare il modello unicamente sulla base degli studi esistenti, ovvero delle analisi idrauliche condotte nell'ambito del P.G.R.A. (Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po).

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 38 di 77 |

Per entrambi i torrenti, si è cercato di riprodurre quanto possibile le aree di allagamento identificate dal P.G.R.A.. È opportuno evidenziare tuttavia che le aree allagabili definite dal PGRA, per come sono state determinate e per il loro livello di dettaglio, forniscono una rappresentazione di massima delle aree di esondazione, e non possono rappresentare un riferimento in senso assoluto per la calibrazione del modello.

La calibrazione è stata pertanto effettuata impostando valori di scabrezza in alveo in modo da riprodurre quanto possibile le aree di allagamento definite dagli studi sopra menzionati. È stata condotta una simulazione per il tempo di ritorno pari a 200 anni, con l'idrogramma di input definito secondo la distribuzione statistica di *Gumbel* (paragrafo 4.2.3).

La figura che segue mostra l'estensione delle aree potenzialmente allagabili per il tempo di ritorno di 200 anni ottenute con il modello numerico 2D, confrontate con quelle definite nell'ambito del PGRA. Tenendo in considerazione anche la differenza sostanziale nel livello di dettaglio delle due analisi messe a confronto, per il Torrente Curone si può osservare un accordo soddisfacente soprattutto nel tratto di monte fino all'attraversamento ferroviario, mentre nel tratto di valle le esondazioni calcolate dal modello risultano di maggiore estensione rispetto a quelle del PGRA, anche se in maniera limitata; per quanto riguarda il Torrente Limbione invece i risultati ottenuti non appaiono sufficientemente confrontabili con le indicazioni di PGRA, secondo cui la maggior parte delle esondazioni avviene nelle aree a monte del modello, impattando di fatto la capacità di effettuare un confronto tra gli allagamenti; il modello implementato mantiene comunque un approccio a favore della sicurezza per l'analisi in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario, massimizzando le portate in arrivo alla sezione di interesse.

Non potendo migliorare i risultati della taratura affidata al confronto con le aree allagabili del PGRA, si è prestata attenzione ad assegnare alla scabrezza in alveo dei valori suggeriti dalla letteratura tecnica (Chow, 1959) in relazione alle condizioni morfologiche e al grado di presenza di vegetazione in alveo.

Per il Torrente Curone è stato imposto un valore di scabrezza pari a $0.045 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$, mentre per il Torrente Limbione è stato scelto un valore pari a $0.04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$.

| | | | | | | |
|---|---|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|--------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 39 di 77 |

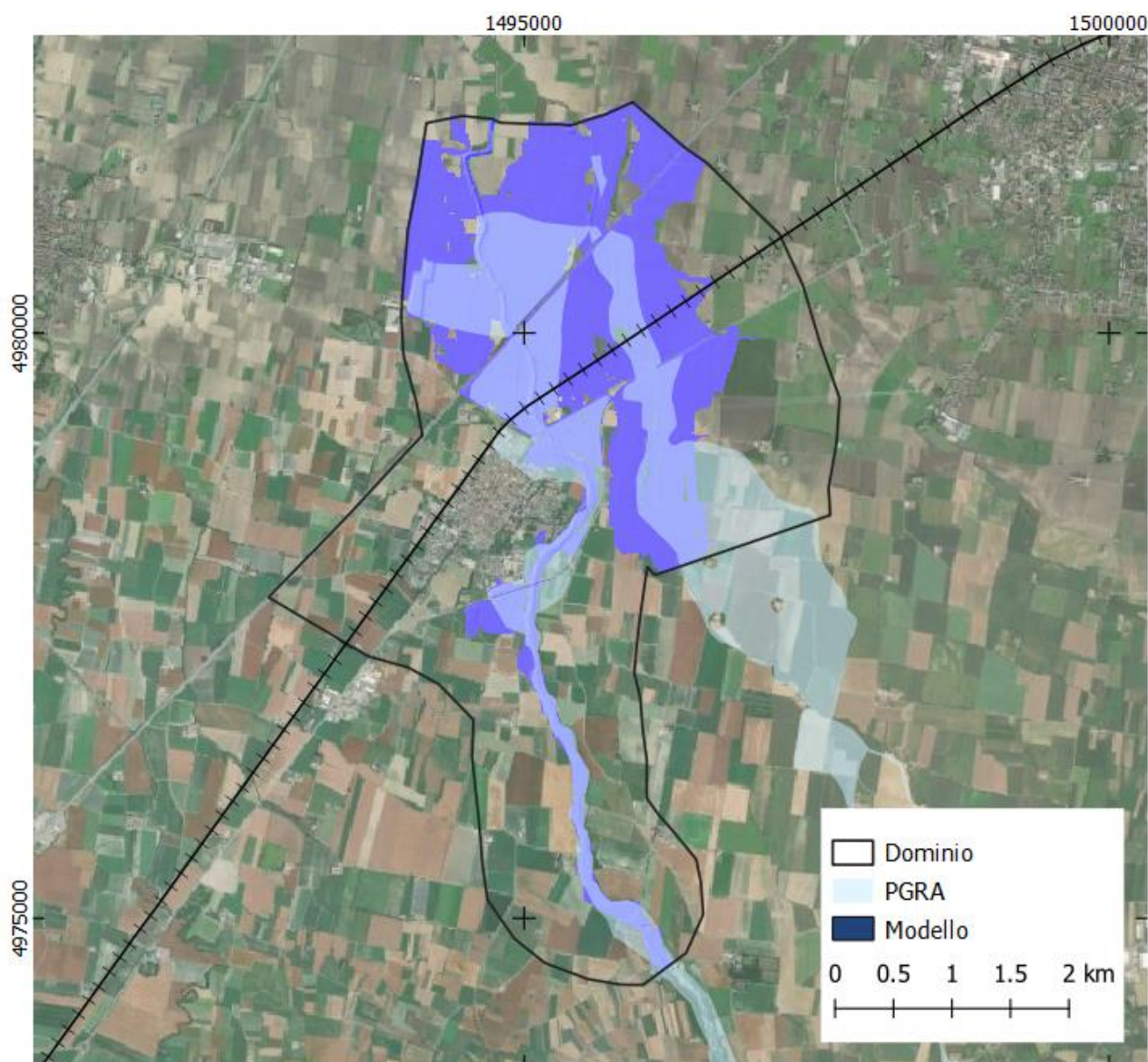


Figura 27: confronto tra aree allagabili calcolate con quelle definite dal PGRA per Tr 200 anni

4.3.2 Modello monodimensionale (1D)

Al fine di verificare il comportamento dei manufatti previsti in progetto nell'ipotesi di transito dell'intera portata idrologica, a seguito di future opere di sistemazione/protezione idraulica del territorio che riducano o eliminino le attuali esondazioni dei due torrenti che si verificano a monte della linea ferroviaria, è stato implementato anche un modello idraulico HEC-RAS monodimensionale (con esondazioni impedito quindi) per ciascun corso d'acqua, per ciascun corso

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 40 di 77 |

d'acqua. Nello specifico tale verifica è volta alla determinazione dei livelli idrici associati alla portata al colmo con tempo di ritorno di 200 anni, da prendere come riferimento nella definizione della quota minima di intradosso delle opere di attraversamento in progetto, secondo i criteri definiti in precedenza.

4.3.2.1 Approccio matematico (1D)

Il calcolo del profilo di corrente in condizioni di moto permanente fra due sezioni successive è effettuato dal software HEC-RAS mediante la soluzione dell'equazione dell'energia, attraverso un processo iterativo denominato '*standard step method*'.

Le caratteristiche principali dell'algoritmo di modellazione 1D del software Hec Ras sono ben descritte nell'omologo paragrafo presente nella relazione annessa IQ0101R09RIID0002001A, al quale si rimanda per maggiori dettagli.

4.3.2.2 Geometria e caratteristiche dei modelli

La geometria dei modelli monodimensionali è stata estratta direttamente dal DTM costruito per il modello 2D, utilizzando le sezioni rilevate, da sponda a sponda, imponendo l'assenza di esondazioni. Le strutture lungo i corsi d'acqua sono state inserite come ponti/tombini (*bridge/culvert*) all'interno della geometria. I parametri di scabrezza dei modelli sono stati anch'essi derivati dal modello 2D.

Per quanto concerne le condizioni al contorno, sia nella sezione di monte che in quella di valle è stata imposta la condizione di moto uniforme ("*Normal Depth*"), in ragione della sufficiente estensione dei modelli rispetto alle sezioni di attraversamento in progetto. Le simulazioni sono state condotte in moto permanente, imponendo il regime di corrente mista.

Come anzidetto, le portate al colmo (Tr200) applicate ai modelli 1D sono quelle derivanti dall'applicazione delle LSPP secondo *Gumbel* (rif. IQ0101R09RIID0001001A); nello specifico,

- Torrente Curone: $Q_{200,Gumbel} = 433.00$ mc/s
- Torrente Limbione: $Q_{200,Gumbel} = 92.40$ mc/s

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 41 di 77 |

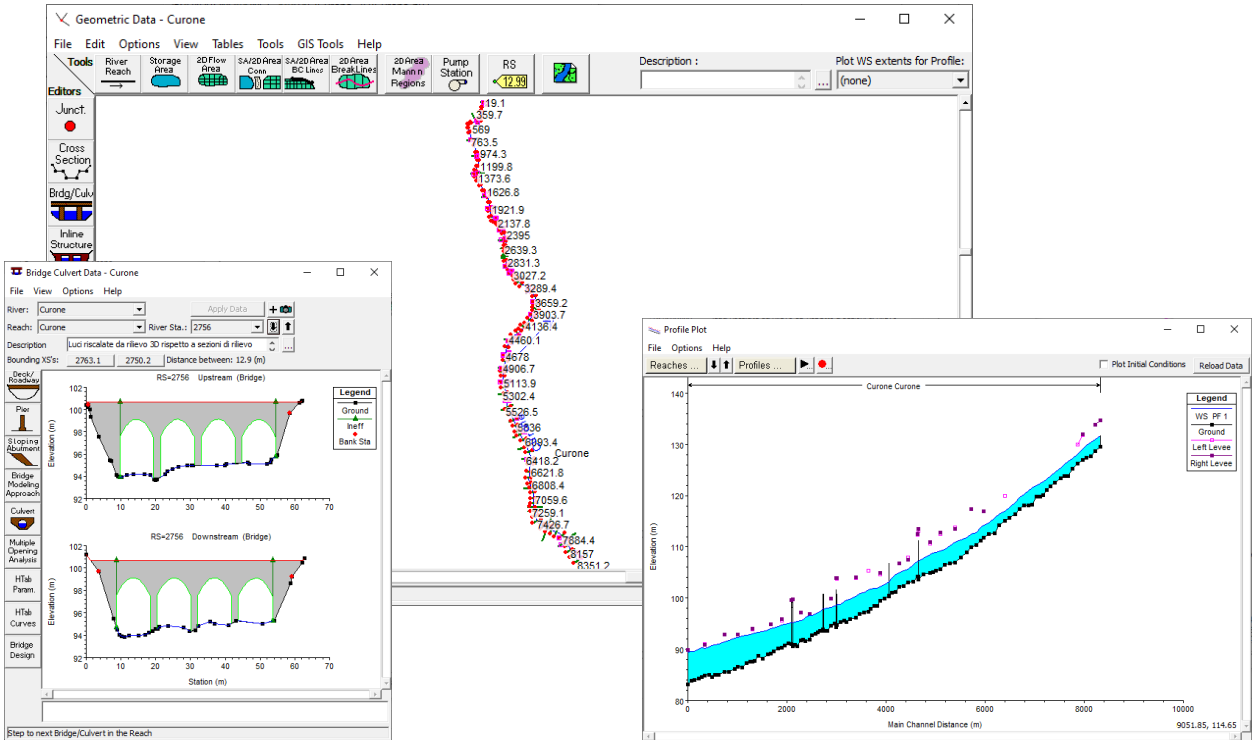


Figura 28: Modello 1D per il Torrente Curone

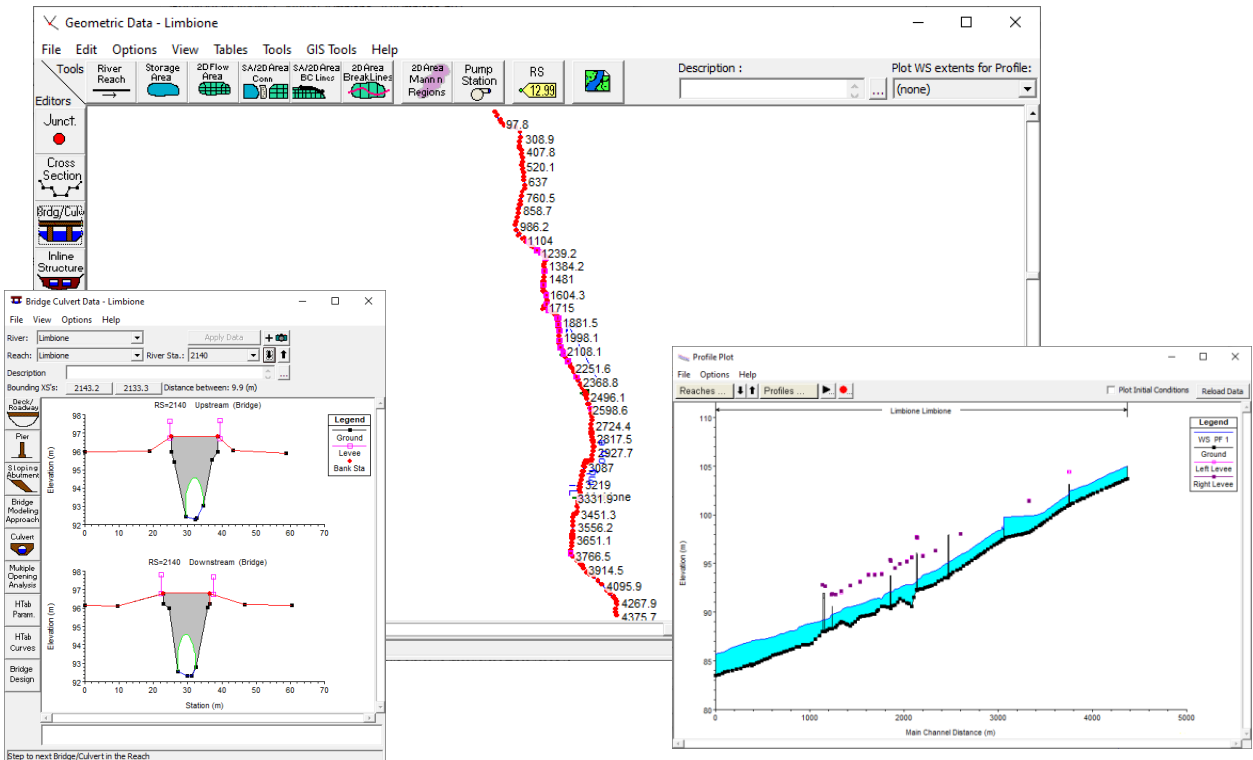


Figura 29: Modello 1D per il Torrente Limbione

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 42 di 77 |

4.4 SIMULAZIONI NUMERICHE DELLE ONDE DI PIENA

4.4.1 Modello numerico 2D

4.4.1.1 Situazione “ante operam”

Dopo le procedure di calibrazione, il modello 2D, così come descritto nel paragrafo 0, è stato utilizzato per condurre tre simulazioni per lo scenario ante operam, rispettivamente per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni, utilizzando gli idrogrammi definiti nel paragrafo 4.2.3, secondo la distribuzione statistica GEV, risultata più cautelativa dalle analisi idrologiche condotte.

I risultati ottenuti hanno portato all'identificazione del campo dei tiranti e delle velocità in tutto il dominio di calcolo. Le figure seguenti mostrano le aree potenzialmente inondabili, classificate in termini di tiranti idrici sul piano campagna, associate all'esondazione delle piene con tempo di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni, nello scenario “*stato attuale*”.

In generale, la linea ferroviaria esistente non risulta mai sormontata (i livelli idrici si attestano sempre al di sotto del piano di regolamento); le aree potenzialmente inondabili che si riscontrano localmente in alcuni tratti a valle della linea esistente sono dovute alla presenza di manufatti di trasparenza idraulica lungo il rilevato ferroviario, nonché di sottovia (soggetti ad allagamento), che consentono il deflusso delle acque esondate a monte della linea FS verso le aree di valle.

Più nel dettaglio, in corrispondenza degli attraversamenti del torrente Curone e del torrente Limbione si evidenziano allagamenti diffusi in occasione di eventi alluvionali estremi.

Entrambi i ponti ferroviari esistenti sul T. Curone e sul T. Limbione sono idraulicamente insufficienti, come meglio evidente nelle figure seguenti riportanti i livelli idrici in corrispondenza della sezione subito a monte di essi.

Inoltre, si evidenzia l'allagamento sia del sottovia esistente di via San Giacomo Gerbida vicino all'attraversamento del T. Curone (in destra idraulica) sia del sottovia di strada Bagnolo in prossimità dell'attraversamento del T. Limbione (in destra idraulica).

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 43 di 77 |

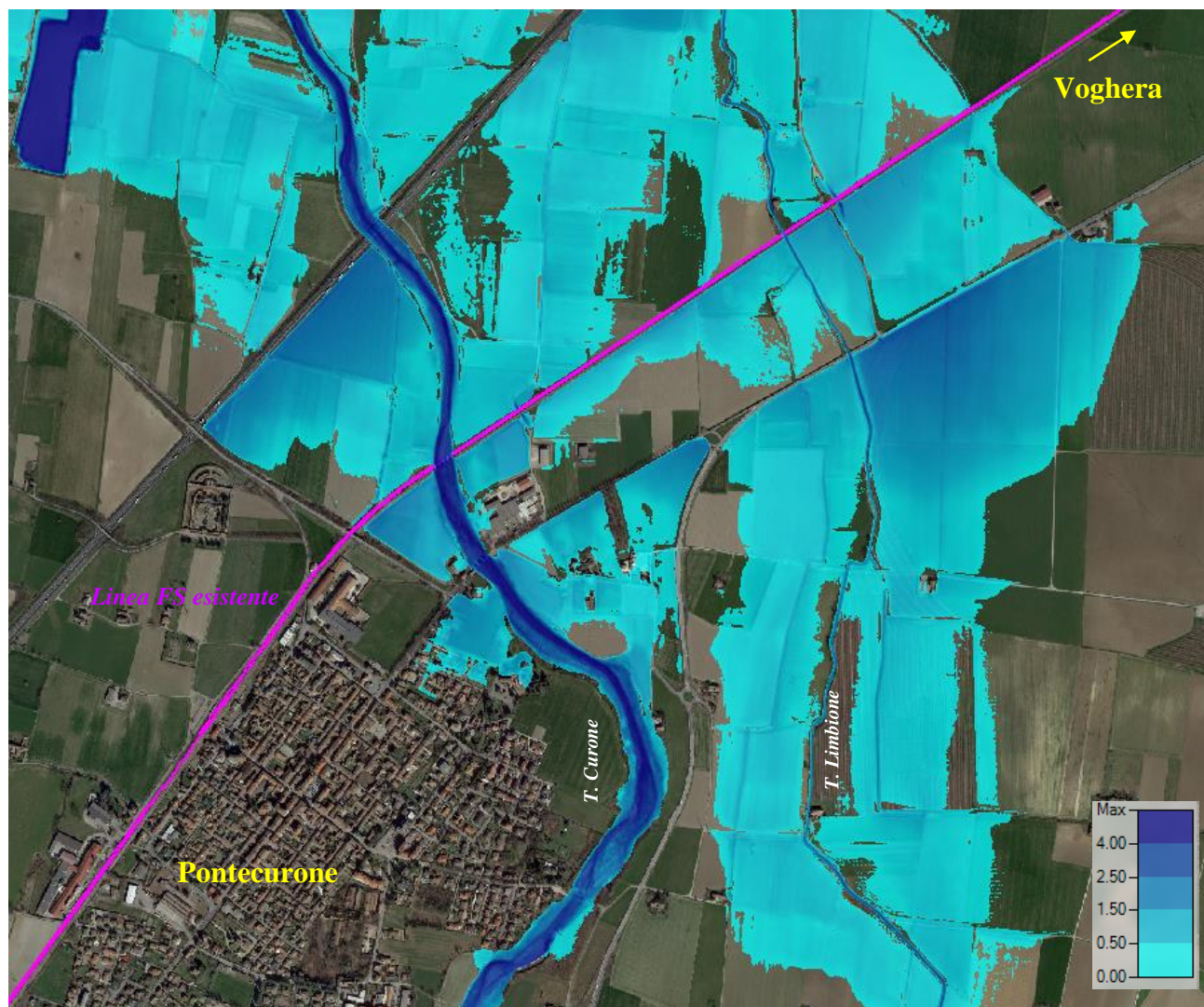


Figura 30: Modello 2D “T. Curone-T. Limbione”: aree potenzialmente inondabili, Tr = 50 anni, ante operam

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 44 di 77 |

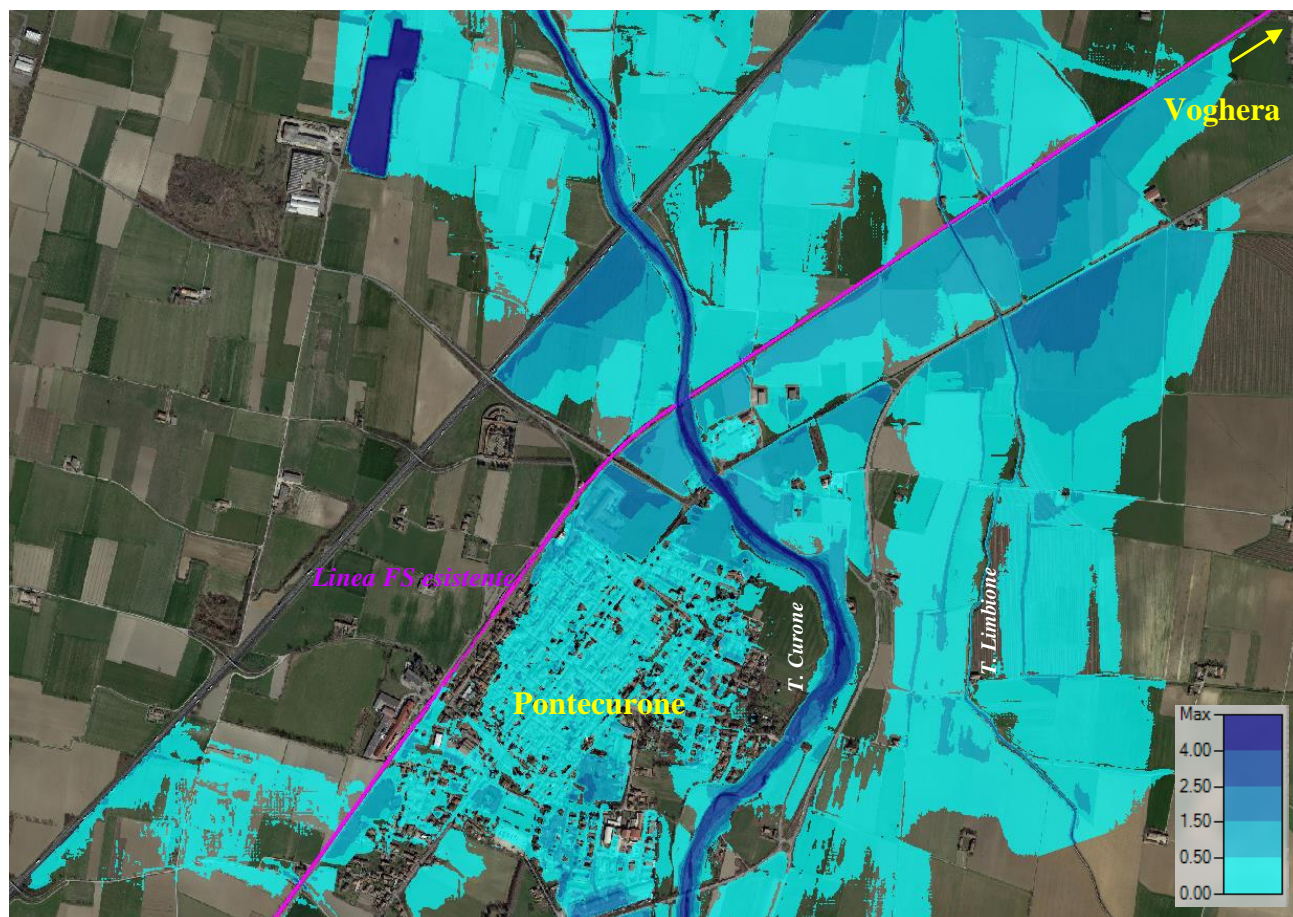


Figura 31: Modello 2D "T. Curone-T. Limbione": aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, ante operam

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 45 di 77 |

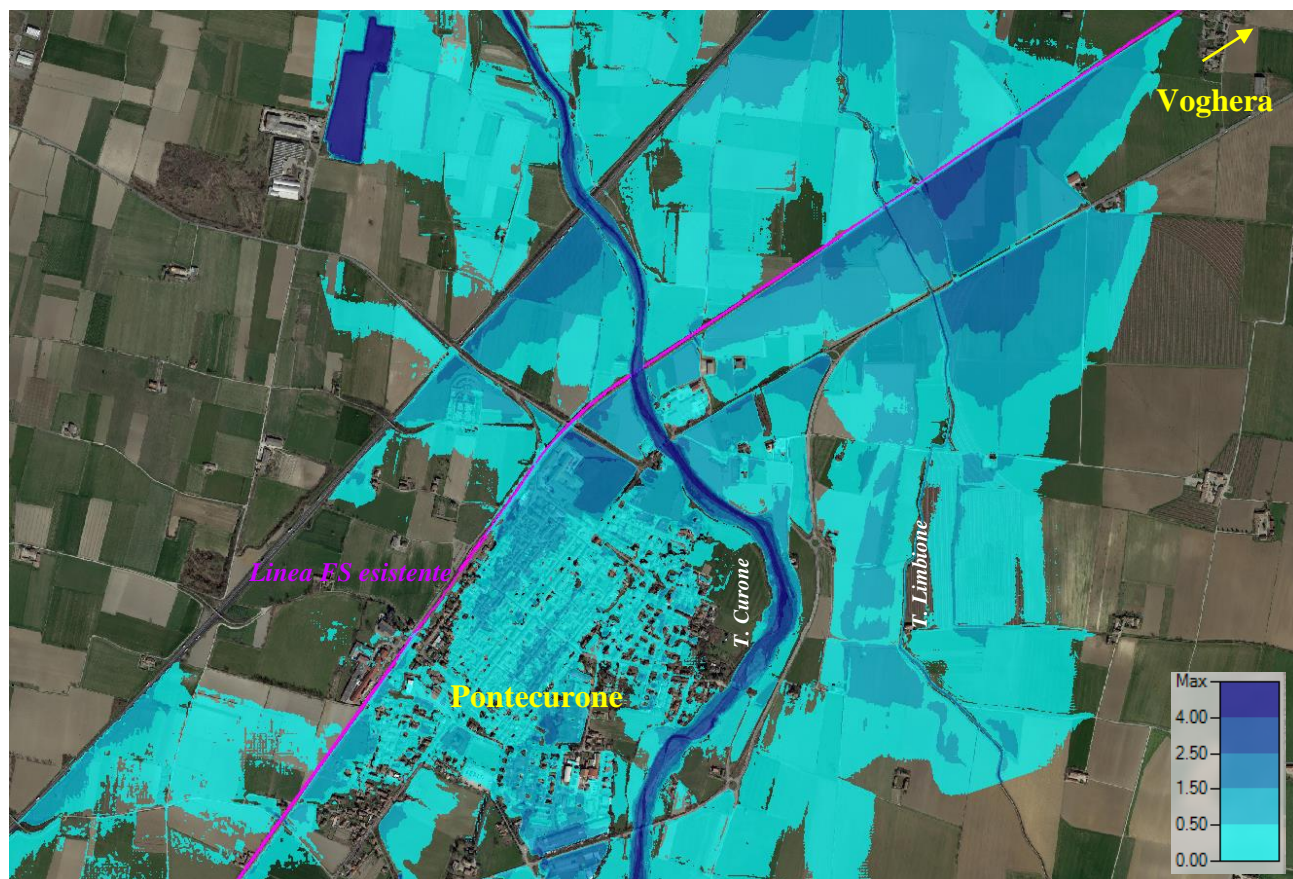


Figura 32: Modello 2D "T. Curone-T. Limbione": aree potenzialmente inondabili, Tr = 500 anni, ante operam

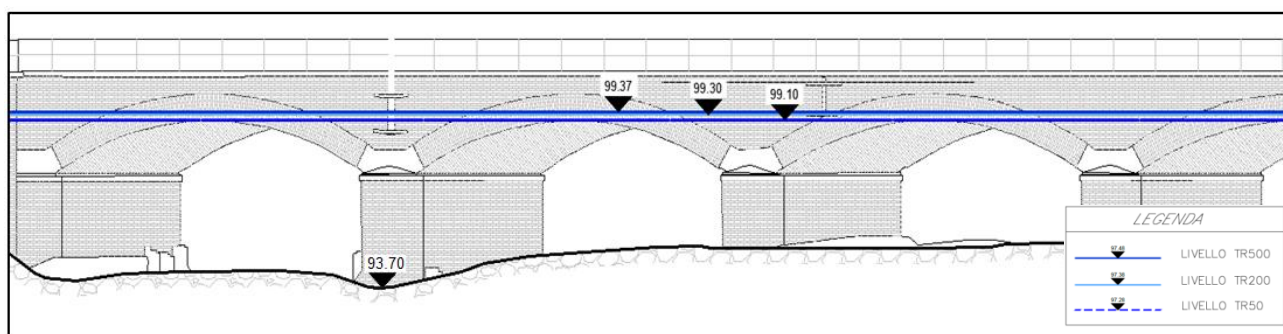


Figura 33: Torrente Curone – Livelli idrici nella sezione a monte dell'attraversamento ferroviario esistente, scenario ante operam.

| | | | | | | |
|---|---|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

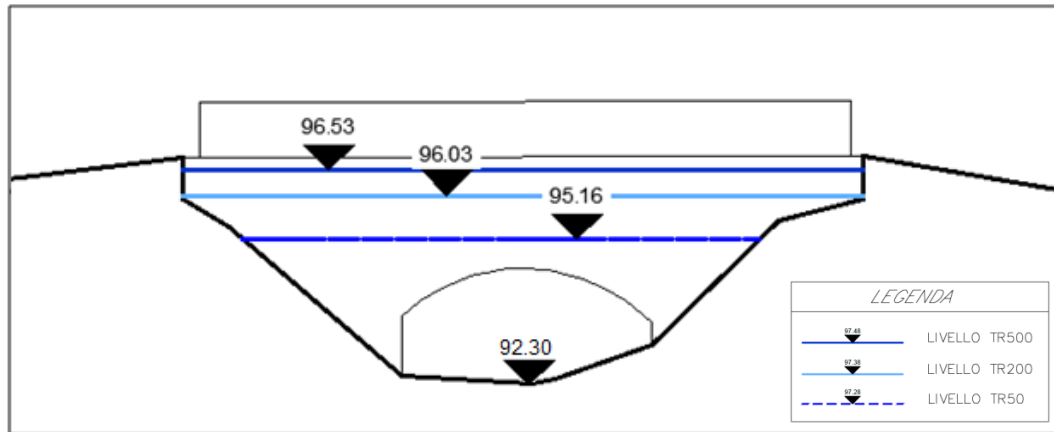


Figura 34: Torrente Limbione – Livelli idrici nella sezione a monte dell’attraversamento ferroviario esistente, scenario ante operam.

4.4.1.2 Situazione “post operam”

Sulla base della configurazione “ante operam”, si è proceduto all’implementazione della configurazione “post operam”, modificando localmente la geometria del sistema, in modo da riprodurre i rilevati, le opere di attraversamento e le sistemazioni idrauliche previste.

In particolare, è stato modificato il DTM di base per il modello ante operam inserendo i nuovi rilevati ferroviari e le pile dei viadotti, modificando localmente la mesh per meglio schematizzare la nuova struttura.

Nelle figure seguenti, il particolare della geometria del modello numerico 2D “post operam” in corrispondenza del Torrente Curone e del Torrente Limbione.

IDROLOGIA E IDRAULICA

**Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione**

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 47 di 77 |

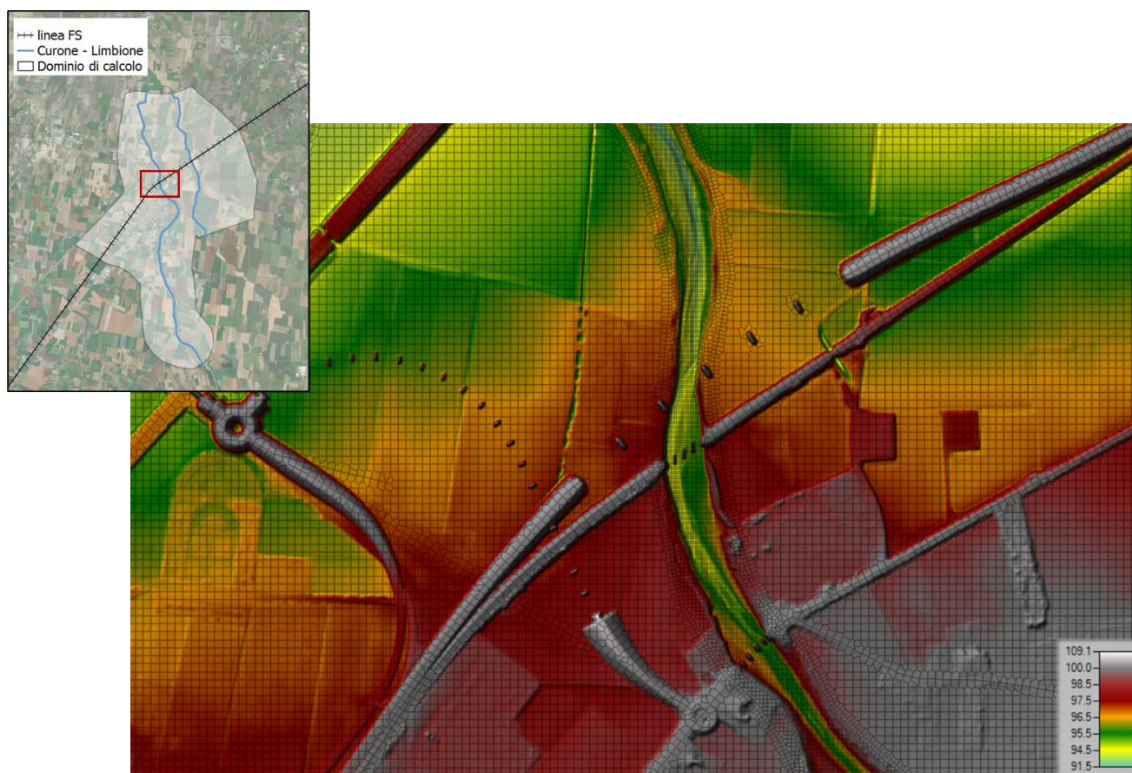


Figura 35: Particolare della mesh post operam in prossimità dell'attraversamento ferroviario del Torrente Curone

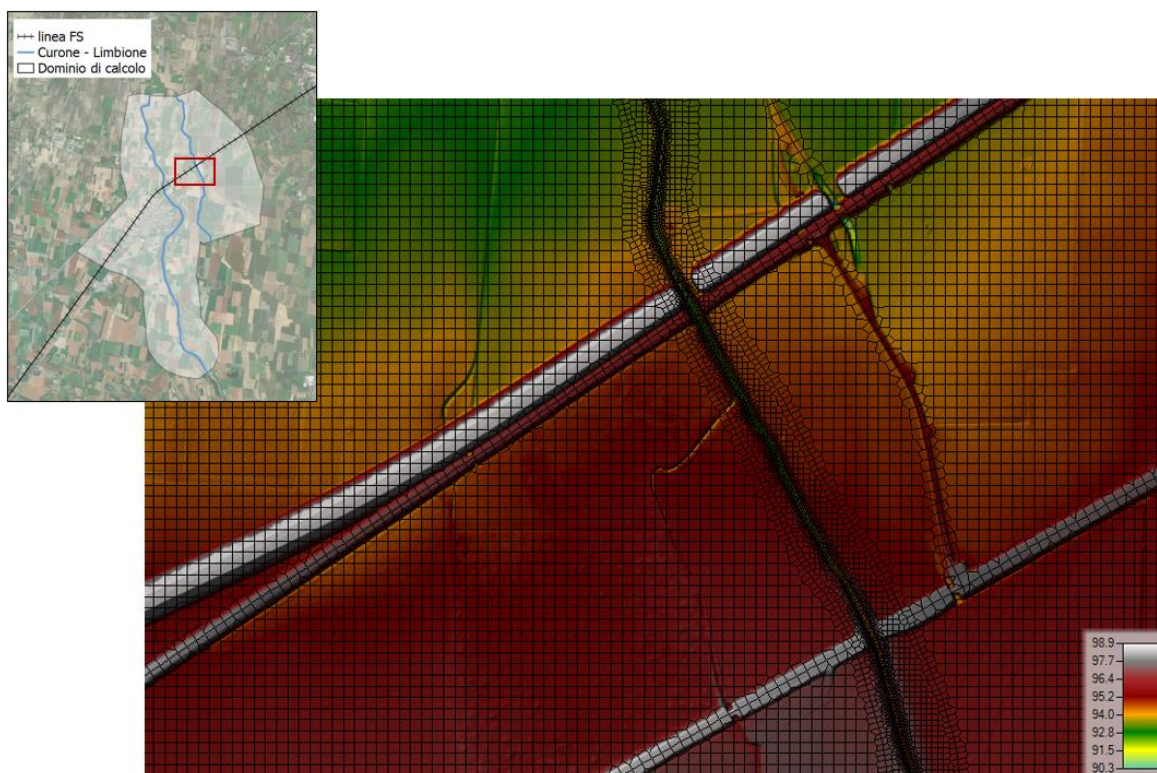


Figura 36: Particolare della mesh post operam in prossimità dell'attraversamento ferroviario del Torrente Limbione

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 48 di 77 |

Si nota come nella configurazione post operam in corrispondenza di Pontecurone (prima dell'attraversamento ferroviario) è stato implementato anche il nuovo cavalcaferrovia della SP93 previsto in progetto (IV02), in sostituzione di quello esistente. Lungo i nuovi rilevati sono state inserite le strutture degli attraversamenti minori in progetto che danno continuità idraulica a quelli presenti nell'attuale rilevato ferroviario. Le opere di attraversamento (VI09, VI10) in progetto (in ragione di una quota di intradosso ben superiore ai livelli idrici di riferimento) non sono state implementate in termini di impalcato. Per il VI09 sul T. Curone sono state implementate le pile interessate dalle piene di riferimento modificando direttamente il DTM di base. Le figure seguenti mostrano le aree potenzialmente inondabili, classificate in termini di tiranti idrici sul piano campagna, associate all'esonazione delle piene con tempo di ritorno pari a 50, 200 e 500 anni, nello scenario "di progetto".

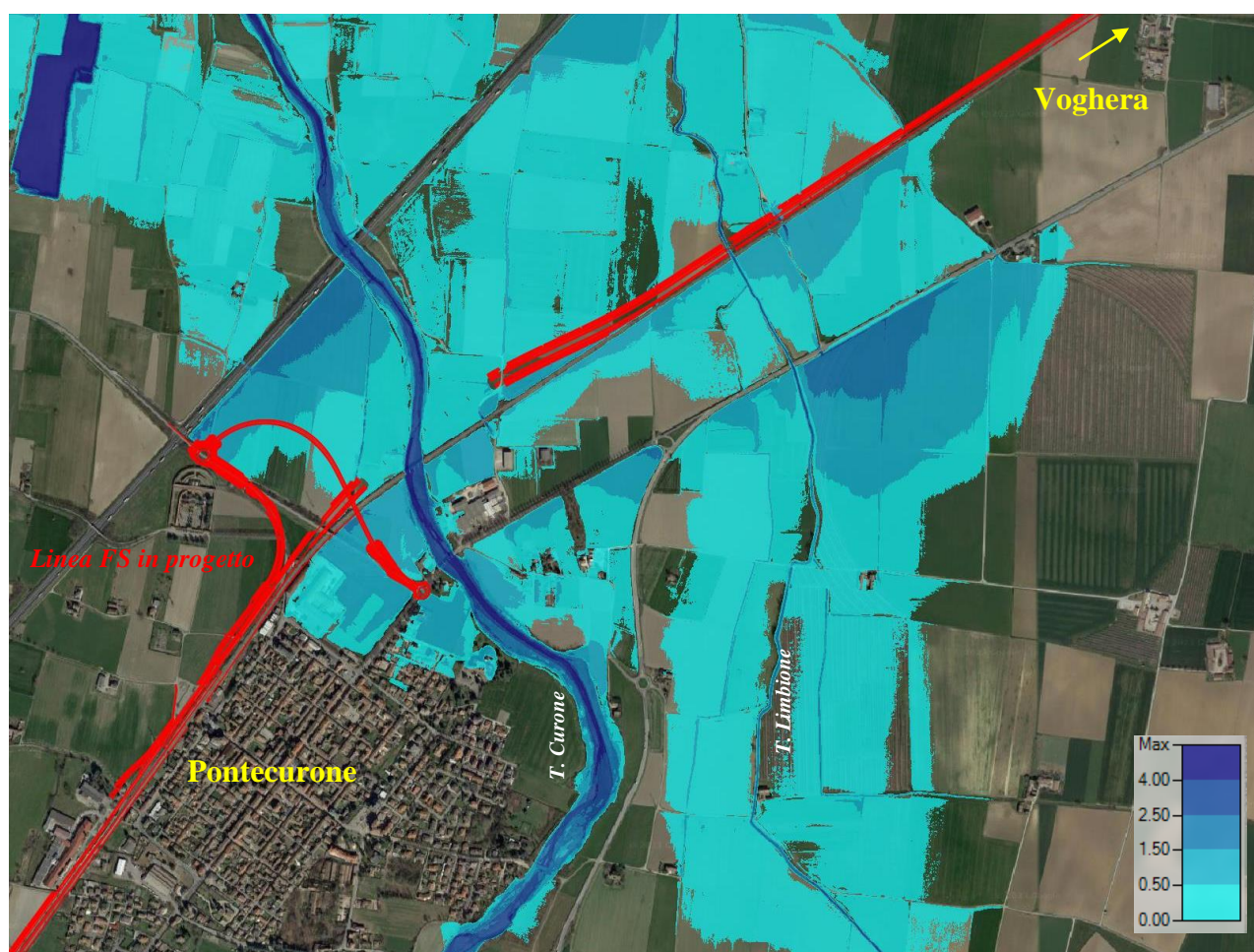


Figura 37: Modello 2D "T. Curone-T. Limbione": aree potenzialmente inondabili, Tr = 50 anni, post operam

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico
bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 49 di 77 |

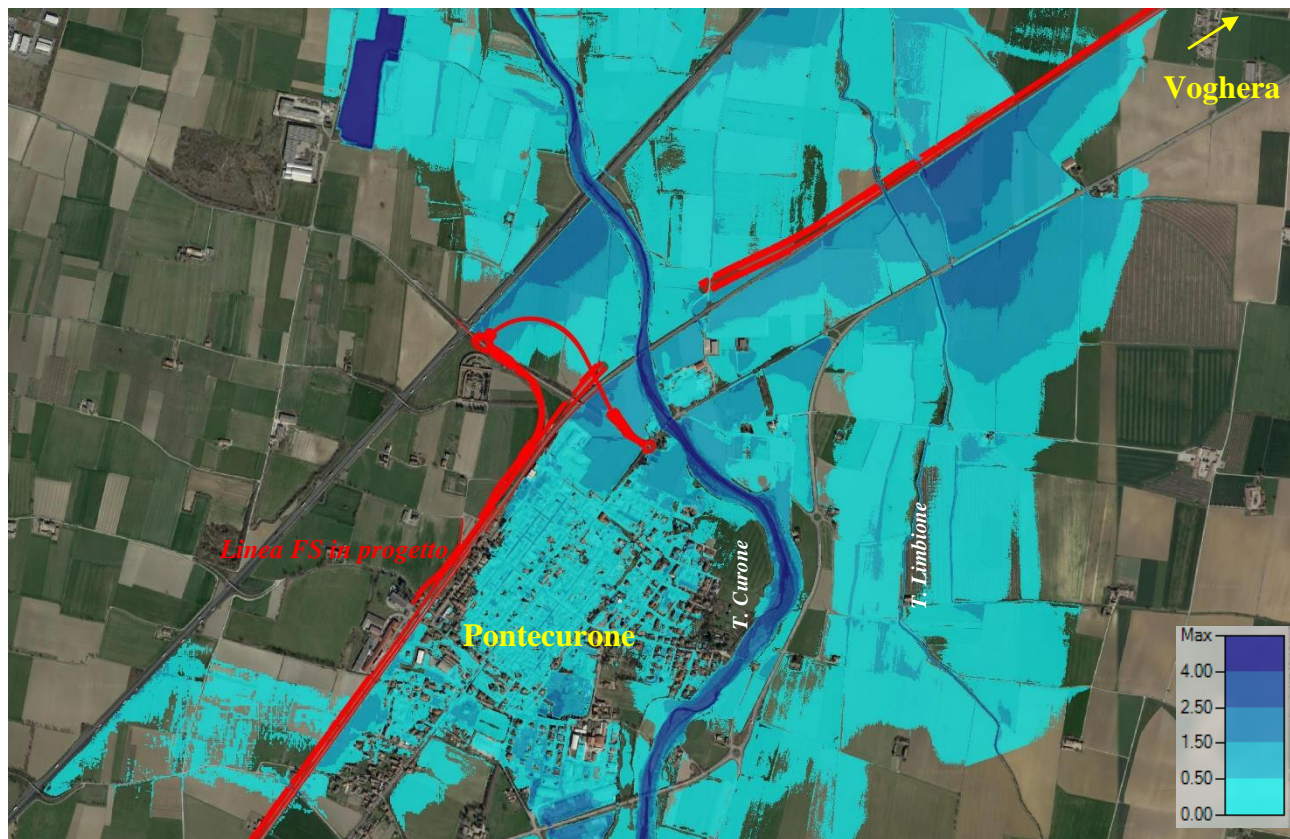


Figura 38: Modello 2D "T. Curone-T. Limbione": aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, post operam

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| <p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>50 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 50 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 50 di 77 | | | | | | | | |

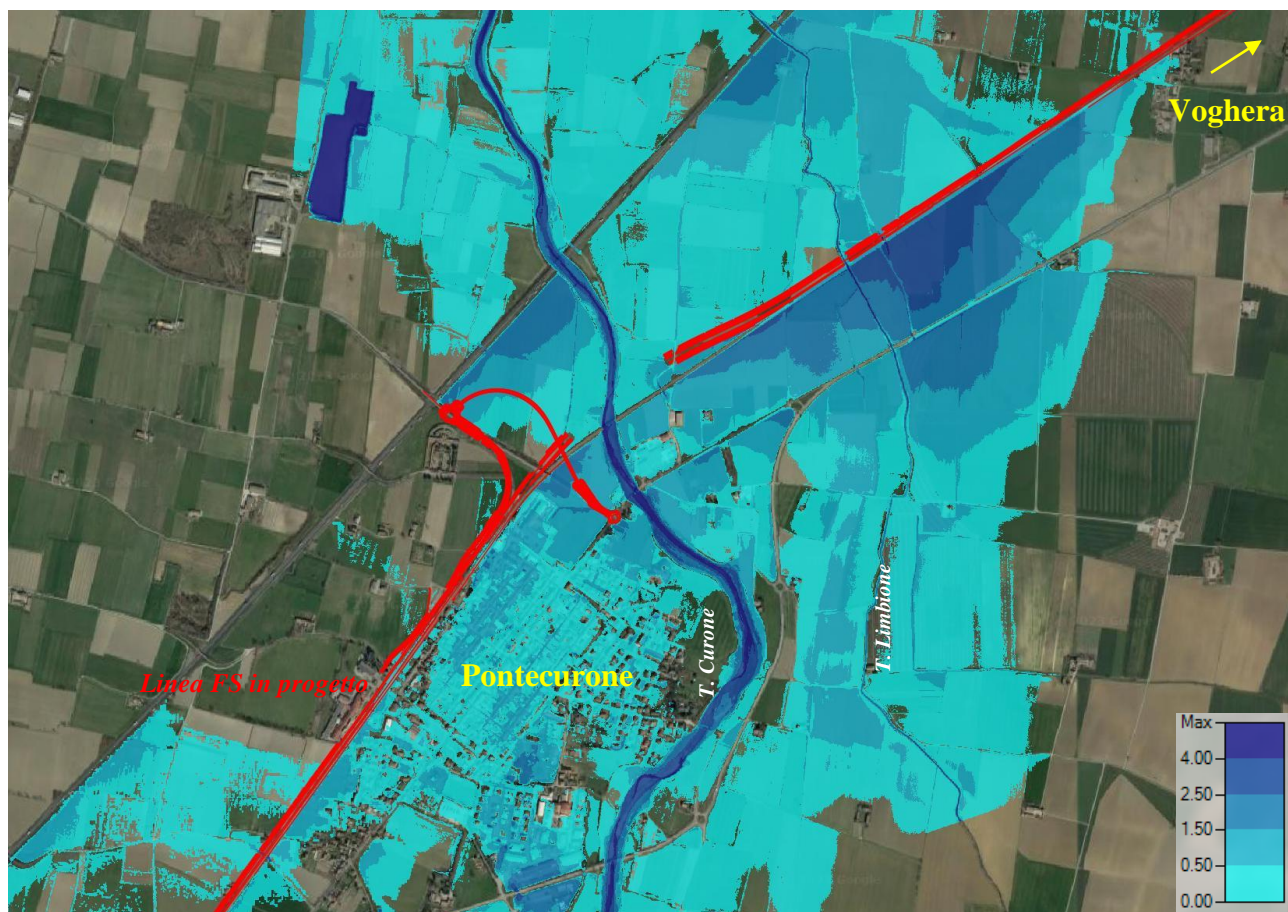


Figura 39: Modello 2D “T. Curone-T. Limbione”: aree potenzialmente inondabili, Tr = 500 anni, post operam

Si riporta anche il particolare delle aree potenzialmente inondabili (Tr200) in corrispondenza dei nuovi attraversamenti sul T. Curone e sul T. Limbione.

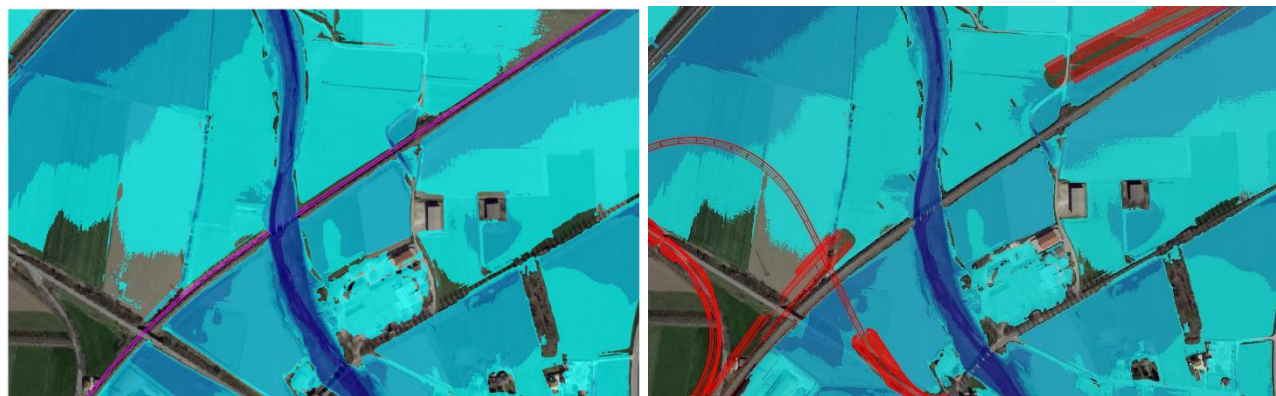


Figura 40: Modello 2D “T. Curone-T. Limbione”: aree potenzialmente inondabili, Tr = 200 anni, in corrispondenza dell’attraversamento del Torrente Curone, nelle situazioni ante operam (a sinistra) e post operam (a destra)

| | | | | | | |
|---|---|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|--------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 51 di 77 |

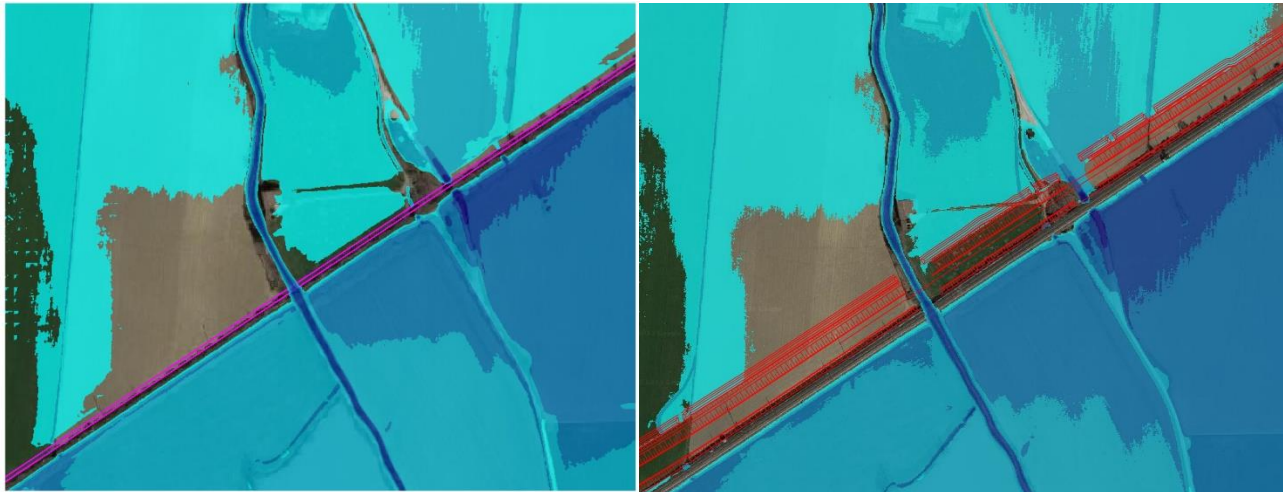


Figura 41: Modello 2D “T. Curone-T. Limbione”: aree potenzialmente inondabili, $T_r = 200$ anni, in corrispondenza dell’attraversamento del Torrente Limbione, nelle situazioni ante operam (a sinistra) e post operam (a destra)

Le opere di attraversamento in progetto sul T. Curone e T. Limbione non alterano le condizioni di pericolosità idraulica già esistenti o che caratterizzano lo stato ante operam (il VI10 sul T. Limbione non interferisce con i deflussi; mentre il VI09 interferisce con i deflussi con pile e, necessariamente, con spalle e rilevati di approccio ai fini del ricongiungimento dei binari di quadruplicamento con la linea ferroviaria storica). Sono stati inseriti anche alcuni tombini/fornici di trasparenza idraulica nel rilevato di approccio (lato Voghera) del VI09, al fine di ridurre l’incremento dei livelli idrici nell’area interclusa (“ferrovia esistente – nuova linea FS”). L’estensione delle aree di esondazione rimane pressoché inalterata; si osserva soltanto un modesto incremento dei livelli idrici (dell’ordine di 10 cm) in destra all’attraversamento del T. Limbione, a monte della linea ferroviaria esistente, a causa della modifica delle condizioni di deflusso all’interno del sottovia (già allagato nell’ante operam) di strada Bagnolo per via della sottrazione di volume operata dal nuovo rilevato di quadruplicamento a valle del sottovia stesso.

Si rimanda comunque agli elaborati specifici per la restituzione grafica dettagliata dei risultati.

Nella tabella seguente, si riportano infine i livelli idrici (da modello 2D) in corrispondenza delle nuove opere di attraversamento sul T. Curone (VI09) e sul T. Limbione (VI10).

| | | | | | | |
|--|---|-------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

Tabella 2 - Livelli massimi a monte dell'attraversamento ferroviario per tempo di ritorno

| Tr (anni) | Livelli idrici (m s.l.m.) | |
|-----------|---------------------------|-------------|
| | T. Curone | T. Limbione |
| 50 | 97.22 | 94.59 |
| 200 | 97.28 | 94.99 |
| 500 | 97.28 | 95.13 |


4.4.2 Modello numerico 1D

Come anticipato, in ragione delle indicazioni pervenute dalla Regione Piemonte (di cui alla nota allegata alla relazione IQ0101R09RIID0002001A) e in ottemperanza delle norme nazionali in materia di difesa del suolo (e.g. DPCM 29.09.1998 e s.m.i.), secondo le quali nelle aree a pericolosità idraulica sono consentiti gli interventi di manutenzione, ampliamento o ristrutturazione delle infrastrutture pubbliche “a condizione che essi non aumentino il livello di rischio comportando significativo ostacolo al deflusso o riduzione apprezzabile della capacità di invaso delle aree stesse e non precludano la possibilità di eliminare le cause che determinano le condizioni di rischio”, è stata verificata la compatibilità idraulica delle opere di attraversamento in progetto, ai sensi delle NTC2018 (e relativa circolare applicativa n.7/2019) e del Manuale di Progettazione Ferroviaria RFI, con riferimento ai risultati di modellazioni monodimensionali (1D) in regime di moto permanente per la cosiddetta “portata idrologica” (i.e. ad esondazioni impedito), situazione manifestabile a seguito di possibili interventi di difesa arginale (in particolare, a monte dei tratti di intervento), già in parte in corso di realizzazione di alcune aste fluviali presenti nell’area di intervento.

E’ tuttavia un’ipotesi molto cautelativa in quanto si dovrebbero modificare/adequare tutte le opere di attraversamento esistenti lungo il tratto fluviale di interesse o si potrebbero invece adottare soluzioni di mitigazione del rischio differenti che prevedono la laminazione del colmo di piena (e anche su questa tipologia di opere si stanno ultimamente indirizzando alcuni finanziamenti).

Premesso ciò, di seguito si riportano i criteri di verifica e dimensionamento adottati per le opere di attraversamento dei corsi d’acqua principali, nel caso specifico viadotto VI09 sul T. Curone e viadotto VII0 sul T. Limbion, con riferimento allo scenario ipotetico futuro più cautelativo:

- **Portata di progetto** → “portata idrologica” (da curve di possibilità pluviometrica secondo Gumbel da ARPA Piemonte, al fine di non tenere conto delle esondazioni che attualmente si verificano lungo le aste fluviali dei corsi d’acqua oggetto di studio e dei loro

| | | | | | | |
|---|---|-------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

effetti di laminazione del colmo di piena - per simulare tale scenario nel modello numerico 1D sono stati cautelativamente eliminati a monte della linea ferroviaria gli attraversamenti idraulicamente insufficienti, che influenzano fortemente il profilo di rigurgito, e aggiunti degli elementi “levee” in tutte le sezioni di calcolo)

- **Franco idraulico minimo (1.5 m, NTC2018)** rispetto al livello idrico Tr200 associato alla *portata idrologica* per i manufatti di attraversamento in progetto
- **Franco idraulico minimo (1 m, P.A.I. e direttiva AdB Po)** tra livello idrico Tr200 associato alla *portata idrologica* e sommità delle arginature previste (i.e. sul T. Grue, rif. IQ0101R09RIID0002001A), nonché tra sommità arginale e quota intradosso delle opere di attraversamento

In tale scenario ipotetico, si è fatto riferimento direttamente alla configurazione “*post operam*”.

Di seguito, i risultati ottenuti.

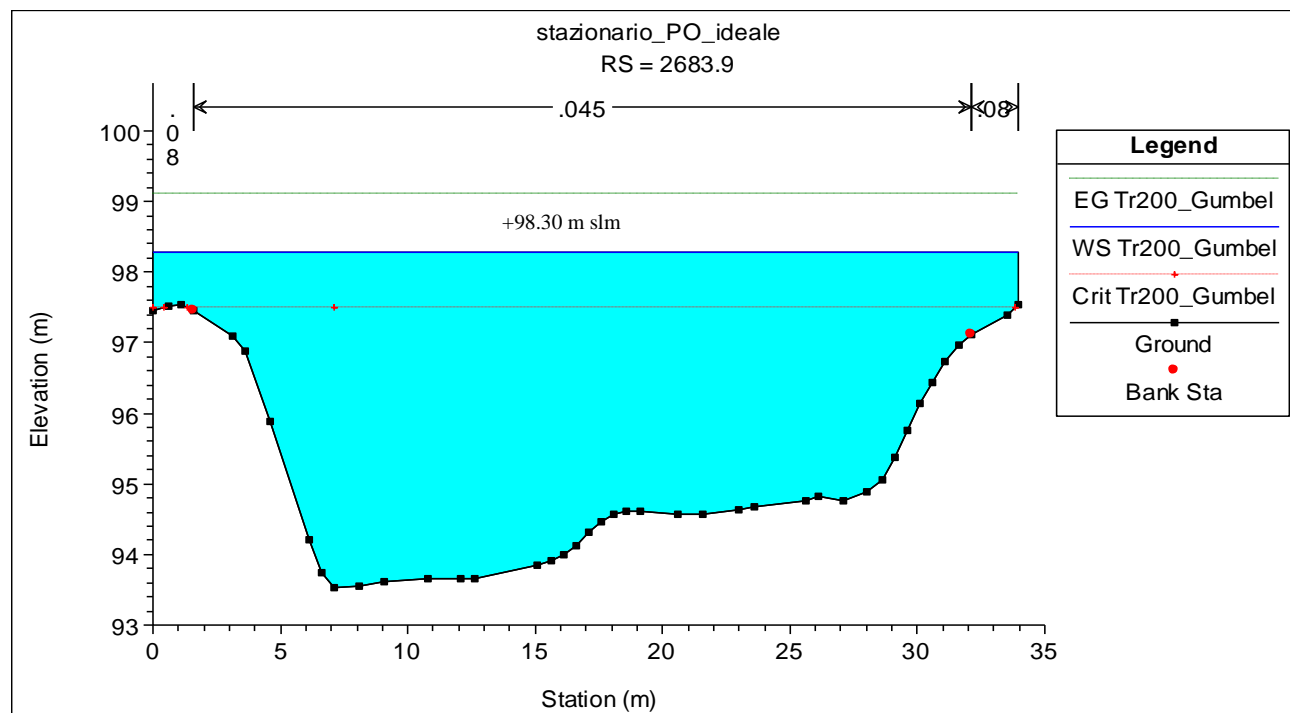


Figura 42: Modello 1D “T. Curone”: livelli idrici (portata idrologica TR200) in corrispondenza del viadotto VI09, post operam.

| | | | | | | |
|---|---|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

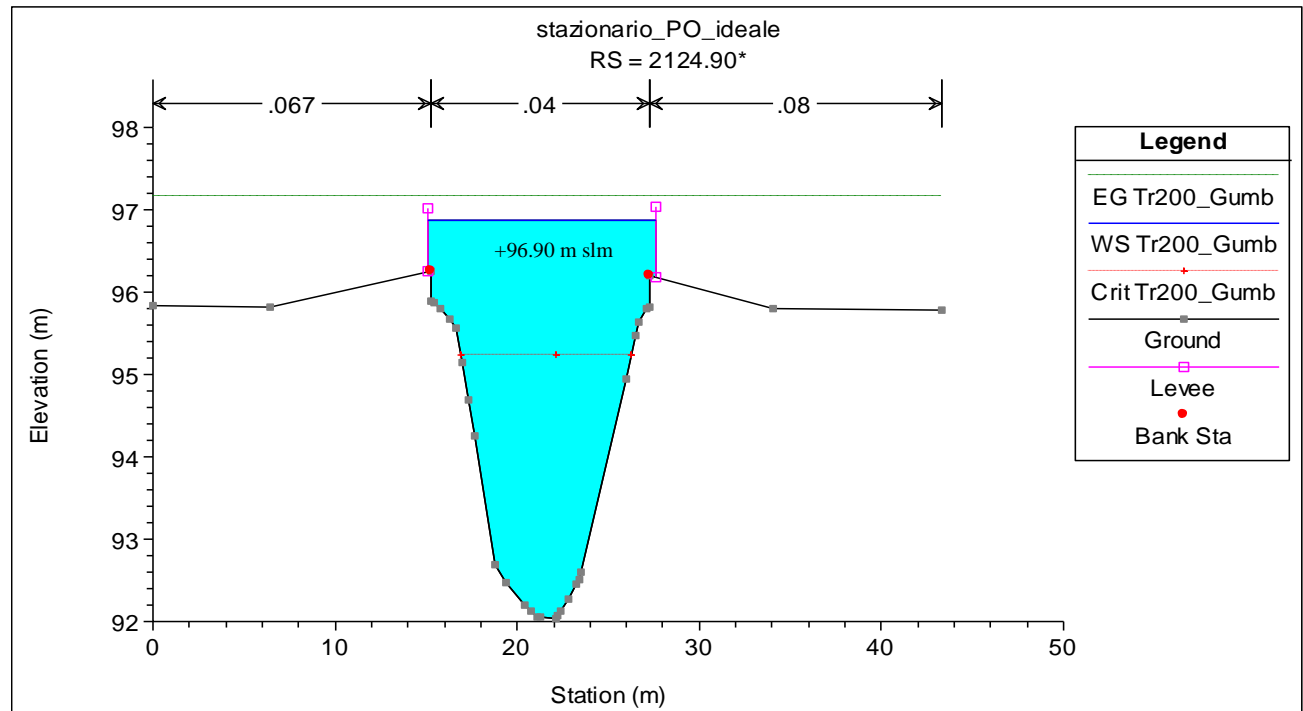


Figura 43: Modello 1D “T. Limbione”: livelli idrici (portata idrologica TR200) in corrispondenza del viadotto VI10, post operam.

Relativamente al T. Curone, il livello idrico di riferimento (per la portata idrologica Tr200) in corrispondenza del nuovo VI09, nella situazione *post operam*, si attesta a +98.30 m slm.

Con riferimento invece al T. Limbione, il livello idrico di riferimento (per la portata idrologica Tr200) in corrispondenza del nuovo VI10, nella situazione *post operam*, si attesta a +96.90 m slm.

4.4.2.1 Verifica delle fasi di realizzazione di opere in alveo

Durante la costruzione delle opere di attraversamento fluviale, nel caso specifico del nuovo viadotto VI09 sul T. Curone, con pile di scavalco dell'alveo inciso in prossimità delle sponde (la cui costruzione richiede la realizzazione di rilevati provvisori in alveo, rif. IQ0101R09P9ID0002001A), cioè prima che le stesse abbiano raggiunto il loro assetto definitivo, si pone il problema della definizione della portata di riferimento per il dimensionamento delle eventuali opere provvisorie del periodo transitorio, di costruzione.

A tal proposito, per la scelta della portata da utilizzare nella verifica della configurazione di cantiere, si è fatto riferimento alla curva di durata delle portate del Torrente Curone, relativa alla stazione idrometrica di Volpedo Curone (ad una distanza di circa 9 km a monte dell'attraversamento

|  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>55 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 55 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 55 di 77 | | | | | | | | |

ferroviario), che sottende un bacino con una superficie di 154 km² (prossima a quella del sottobacino di riferimento, con sezione di chiusura in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario, superficie 165.7 km²). Nello specifico, sono state considerate le curve di durata delle portate del T. Curone determinate per il periodo 2004-2019 (fonte: Arpa Piemonte, https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-idrologica.html), riportate nella figura seguente.

Le curve di durata più cautelative (per tutte le durate) risultano essere quelle relative agli anni 2019, 2014, 2009.

In relazione alle lavorazioni che verranno effettuate in alveo e alla loro durata, si è deciso di fare riferimento alla portata corrispondente a **10 giorni**, cioè si è ipotizzato che la portata del corso d'acqua che transita in sicurezza nella configurazione di cantiere sia pari o inferiore a quella presente per 355 giorni all'anno nel tratto fluviale di interesse, ovvero si ammette una possibile interruzione dei lavori durante l'anno di almeno 10 giorni. Tale valore di portata si attesta a **59 m³/s** (dalla curva di durata, più gravosa per la durata scelta, relativa all'anno 2019).

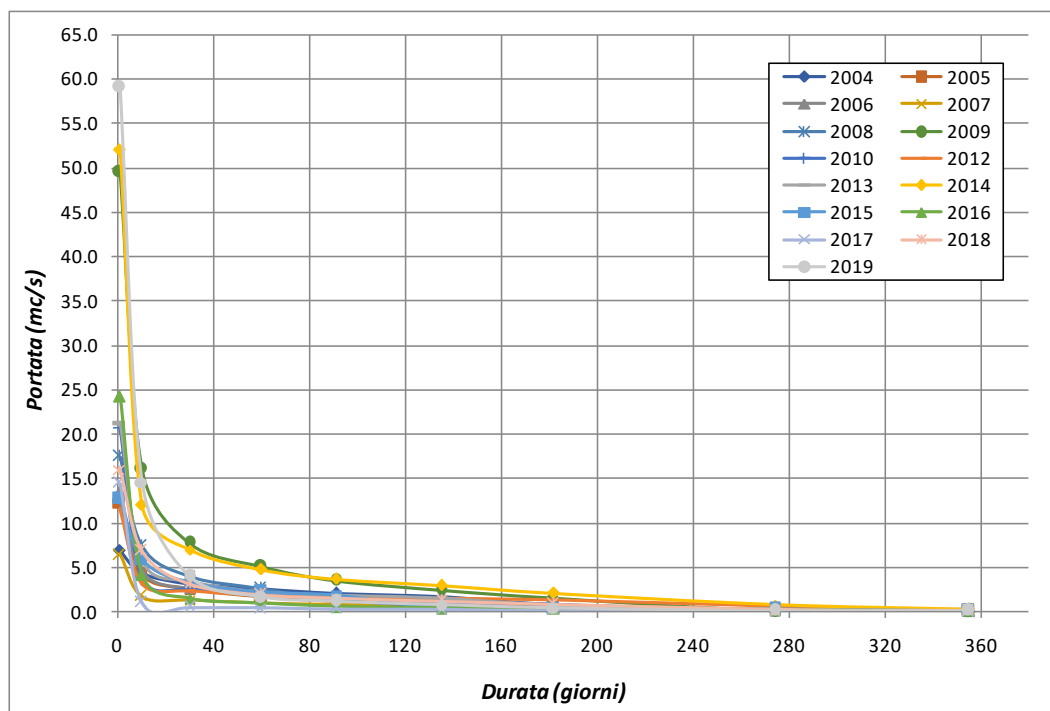


Figura 44: T. Curone: curva di durata delle portate (fonte: Arpa Piemonte).

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 56 di 77 |

Per completezza, tale valore di portata riferito alla stazione di Volpedo Curone, è stato “*trasferito*” alla sezione di chiusura di interesse per mezzo della formula di Gherardelli & Marchetti:

$$\frac{Q_a}{S_a^{-2/3}} = \frac{Q_b}{S_b^{-2/3}}$$

con Q_a e S_a , portata e superficie del bacino sottesa alla sezione di chiusura presso la stazione di Volpedo; Q_b e S_b , portata e superficie del bacino sottesa ad una particolare sezione di chiusura, da cui una portata di riferimento per la verifica delle fasi di realizzazione del nuovo viadotto VI09 sul T. Curone pari a **60.50 m³/s**.

La verifica idraulica della fase transitoria di cantiere è stata eseguita utilizzando il modello monodimensionale 1D, in regime di moto permanente, sviluppato per il *Torrente Curone*, descritto in precedenza, adottando le medesime impostazioni riguardanti scabrezze, regime della corrente, condizioni al contorno.

Per la realizzazione delle pile di scavalco del viadotto VI09 sul Torrente Curone, sono state ipotizzate ed analizzate le seguenti 2 fasi di realizzazione:

Fase 1 - realizzazione della pila P3

- costruzione del rilevato provvisorio sulla sponda in destra idraulica per la realizzazione del piano di lavoro
- realizzazione delle opere provvisorie (paratia di pali)
- costruzione dell'opera di fondazione
- costruzione della pila
- rimozione delle opere provvisorie (rilevato in alveo e paratia di pali)
- posa in opera degli interventi di sistemazione/protezione idraulica previsti per la sponda destra (rif. IQ0101R09PZID0002003A)

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 57 di 77 |

Fase 2 - realizzazione della pila P2

- costruzione del rilevato provvisorio sulla sponda in sinistra idraulica per la realizzazione del piano di lavoro
- realizzazione delle opere provvisorie (paratia di pali)
- costruzione dell'opera di fondazione
- costruzione della pila
- rimozione delle opere provvisorie (rilevato in alveo e paratia di pali)
- posa in opera degli interventi di sistemazione/protezione idraulica previsti per la sponda sinistra (rif. IQ0101R09PZID0002003A)

L'esecuzione delle fasi sopra individuate potrà avvenire anche secondo una sequenza temporale differente, purché non vengano effettuate contemporaneamente.

Nella figura seguente, si riporta una schematizzazione grafica delle fasi sopra descritte.

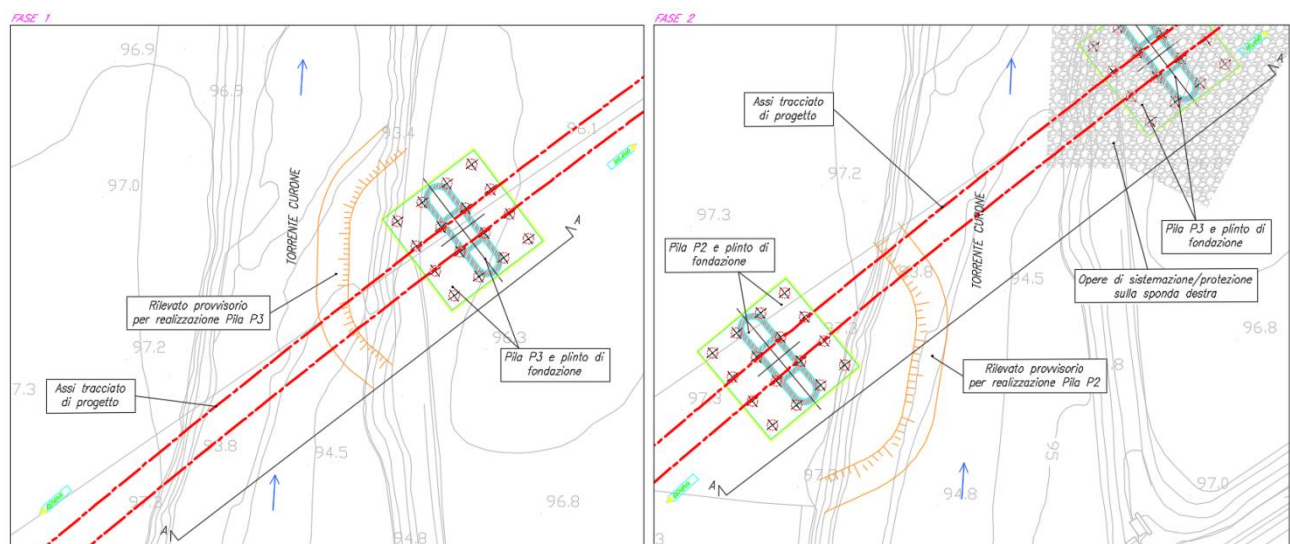



Figura 45: T. Curone: Schematizzazione delle fasi di cantiere

I rilevati provvisori in corrispondenza delle sponde sono stati simulati nel modello 1D HEC RAS tramite l'opzione "Obstructions". Di seguito, i risultati ottenuti (in termini di tiranti idrici) relativi alle fasi 1 e 2, nella sezione a monte dell'attraversamento in progetto, in corrispondenza della quale

| | | | | | | |
|---|---|-------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

si ha il maggior livello idrico (nel tratto di interesse), considerato quindi per la definizione della quota di sommità delle opere provvisionali.

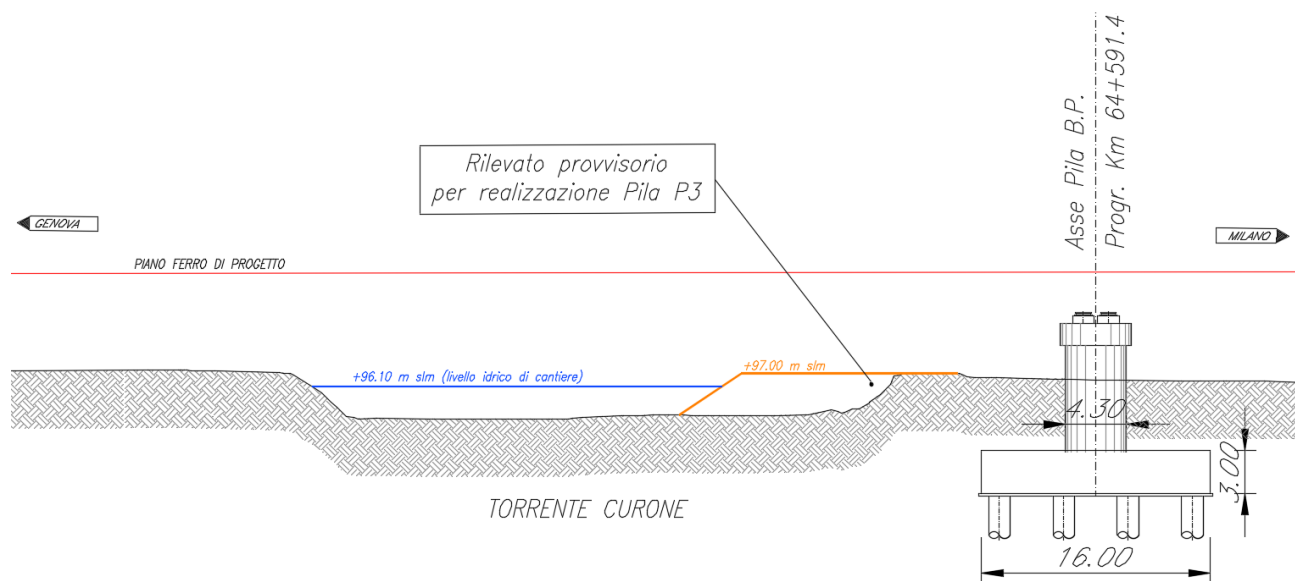


Figura 46: T. Curone, sezione lungo l'asse del tracciato ferroviario: fase di cantiere 1, livello idrico atteso in alveo in presenza delle opere provvisionali

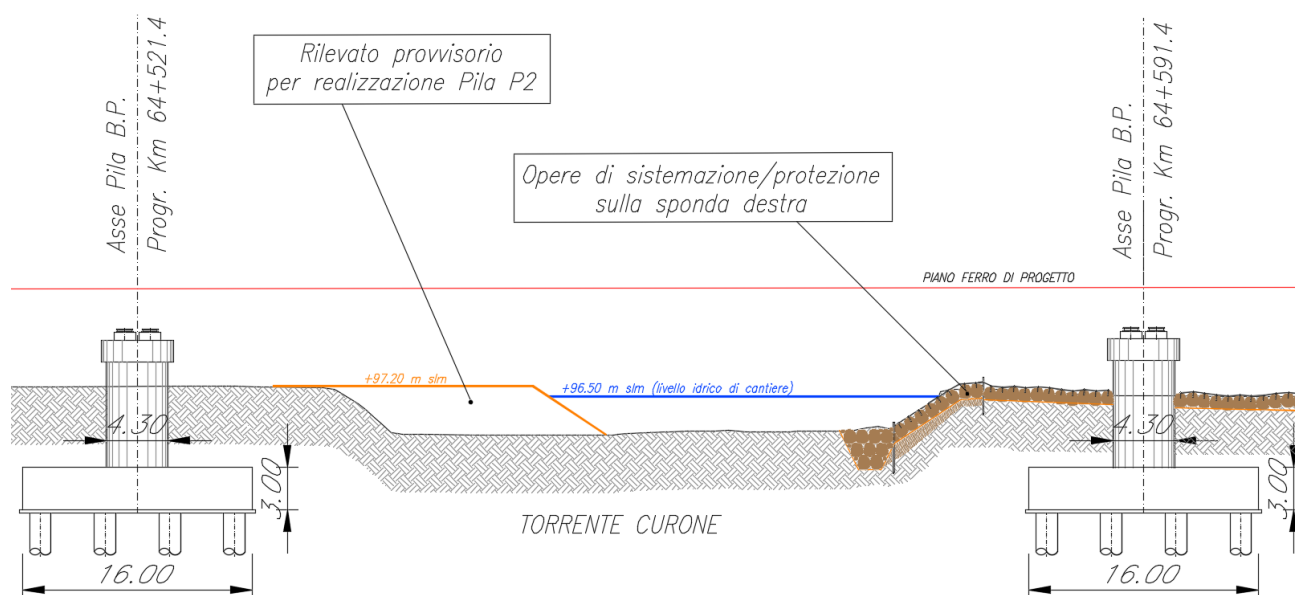


Figura 47: T. Curone, sezione lungo l'asse del tracciato ferroviario: fase di cantiere 2, livello idrico atteso in alveo in presenza delle opere provvisionali

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 59 di 77 |

Nello specifico, per quanto concerne la fase 1, il livello idrico di riferimento si attesta a +96.10 m slm; la sommità del rilevato provvisorio sulla sponda destra si attesta a +97.00 m slm (da cui un franco idraulico di 90 cm).

Con riferimento alla fase 2, il livello idrico di riferimento si attesta invece a +96.50 m slm; la sommità del rilevato provvisorio sulla sponda sinistra si attesta a +97.20 m slm (da cui un franco idraulico di 70 cm).

| | | | | | | |
|---|---|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

5 VERIFICA DEL FRANCO IDRAULICO DI PROGETTO

Nelle tabelle seguenti è riportata la verifica del franco idraulico di progetto dei nuovi viadotti VI09 (T. Curone) e VI10 (T. Limbione), eseguita secondo le normative vigenti (i.e. NTC2018 e M.d.P. RFI 2020), con riferimento ai criteri sopra definiti.

Per completezza, oltre alla verifica rispetto al livello idrico associato alla portata idrologica Tr200 derivante da modellazioni 1D, si riporta anche quella rispetto al livello idrico Tr200 derivante da modellazioni 2D, influenzato quindi dagli effetti di laminazione delle esondazioni che si verificano nei tratti fluviali a monte, rappresentante le condizioni di deflusso esistenti che caratterizzano la configurazione attuale del territorio. Viene riportata anche la verifica per il nuovo cavalcaferrovia della SP93 (IV02), derivante da modellazioni 2D.

Tabella 3 – Viadotto VI09 (Torrente Curone): verifica del franco idraulico di progetto.

| Tipologia di modellazione numerica | Quota minima impalcato [m slm] | Livello di piena Tr200 [m slm] | Carico totale Tr200 [m slm] | Franco sul livello Idrico Tr200 [m] | Franco sul carico totale Tr200 [m] | Verifica |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| 1D | +101.3 | +98.30 | +99.10 | +3.00 (> 1.50 m) | +2.20 (> 0.50 m) | OK |
| 2D | | +97.28 | +98.10 | +4.02 (> 1.50 m) | +3.20 (> 0.50 m) | OK |

Tabella 4 – Viadotto VI10 (Torrente Limbione): verifica del franco idraulico di progetto.

| Tipologia di modellazione numerica | Quota minima impalcato [m slm] | Livello di piena Tr200 [m slm] | Carico totale Tr200 [m slm] | Franco sul livello Idrico Tr200 [m] | Franco sul carico totale Tr200 [m] | Verifica |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| 1D | +98.80 | +96.90 | +97.20 | +1.90 (> 1.50 m) | +1.60 (> 0.50 m) | OK |
| 2D | | +94.99 | +95.30 | +3.81 (> 1.50 m) | +3.50 (> 0.50 m) | OK |

Tabella 5 – Viadotto IV02: verifica del franco idraulico di progetto.

| Tipologia di modellazione numerica | Quota minima impalcato [m slm] | Livello di piena Tr200 [m slm] | Carico totale Tr200 [m slm] | Franco sul livello Idrico Tr200 [m] | Franco sul carico totale Tr200 [m] | Verifica |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------|
| 2D | +100.28 | +96.53 | +96.53 | +3.75 (> 1.50 m) | +3.75 (> 0.50 m) | OK |

| | | | | | | |
|--|---|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|--------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 61 di 77 |

Relativamente al carico totale in corrispondenza del cavalcavia sulla S.P.93, avendo in tale zona una velocità di 8 cm/s, il carico energetico risulta inferiore a 0.3 mm; inoltre, la velocità massima in corrispondenza dell'asse stradale è di circa 0.3 m/s a cui corrisponde un carico di 4.5 mm. Tali valori risultano quindi non percepibili.

Inoltre, è rispettata la prescrizione di distanza minima di 6-7 m tra quota di intradosso e fondo alveo così come indicato nella circolare n.7/2019 delle NTC2018, da garantire nel caso *"si possa verificare nella sezione oggetto dell'attraversamento il transito di tronchi di rilevanti dimensioni....."*. Nello specifico, per il VI09 sul T. Curone, fondo alveo: +93.80 m slm, quota intradosso: +101.30 m slm, da cui una distanza *"fondo alveo – sottotrave"* di +7.50 m; per il VI10 sul T. Limbione, fondo alveo: +92.00 m slm, quota intradosso: +98.80 m slm, da cui una distanza *"fondo alveo – sottotrave"* di +6.80 m.

Come descritto in precedenza, il viadotto VI09 è costituito di 6 campate da 70 metri. Tale scansione consente di avere campate con luce netta in direzione ortogonale alla corrente di 40.5 m, in accordo al minimo previsto (40 m) dalle NTC 2018, come mostrato nella figura seguente riportante la mappa dei vettori velocità in corrispondenza del VI09 estratta dalle simulazioni numeriche bidimensionali.

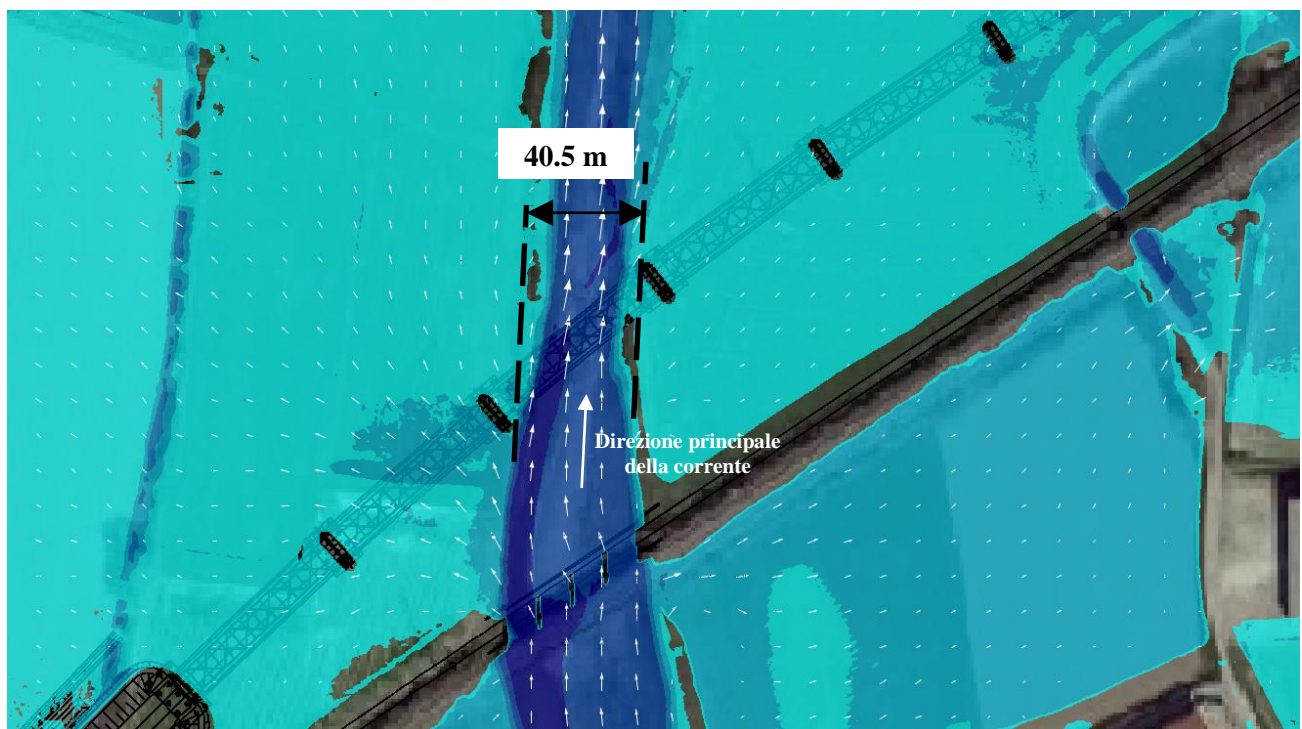


Figura 48: Modello 2D "Torrente Curone": mappa dei vettori velocità (Tr200) in corrispondenza del VI09.

| | | | | | | |
|--|---|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|--------------------|
|  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 62 di 77 |

6 VERIFICA ALLO SCALZAMENTO

In ragione dei risultati delle simulazioni numeriche idrauliche condotte, si è proceduto alla valutazione della profondità massima di erosione attesa attorno alle pile del **nuovo viadotto VI09** in progetto, interessate dalle piene del **Torrente Curone**. Nello specifico, si è fatto riferimento a quanto indicato nelle NTC2018:

“Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associate al livello idrico massimo che si verifica mediamente ogni anno (si assuma $Tr = 1,001$) devono essere combinate con le altre azioni variabili adottando valori del coefficiente Ψ_0 unitario. Lo scalzamento e le azioni idrodinamiche associati all’evento di piena di progetto devono essere combinate esclusivamente con le altre azioni variabili da traffico, adottando per queste ultime i coefficienti di combinazione Ψ_1 .”

Sono state applicate le seguenti due formulazioni disponibili nella letteratura tecnica. Come valore di progetto dello scalzamento è stato considerato il valore massimo ottenuto dalle due relazioni.

Formulazione CSU

La profondità di scalzamento attesa può essere stimata come:

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2 \cdot K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{a}{Y_1} \right)^{0.65} FR^{0.43}$$

in cui

- K_1, K_2, K_3 sono fattori correttivi legati alla forma delle pile, all’angolo di attacco e alle condizioni del fondo alveo (vedi tabella seguente)
- K_4 è un fattore correttiva legato al materiale di fondo alveo, valutabile come:

$$K_4 = [1 - 0.89(1 - V_r)^{0.053}]^{0.5}$$

dove $V_r = \frac{V_0 - V_i}{V_{c90} - V_i}$, $V_i = 0.645(d_{50}/a)^{0.053} V_{c50}$, $V_{c90} = 10.95(Y_1)^{1/6} d_{90}^{1/3}$, $V_{c50} = 10.95(Y_1)^{1/6} d_{50}^{1/3}$, d_{50}, d_{90} = diametro corrispondente al 50% e al 90 % di passante in peso

- Y_s , la profondità di scalzamento;
- Y_1 , l’altezza della corrente;
- a , la larghezza della pila;
- FR , il numero di Froude ($FR = V_0/(gh_m)^{1/2}$)

| | | | | | | |
|---|---|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

Tabella 6- Formulazione CSU: valori dei fattori correttivi K1, K2, K3.

| Correction Factor, K ₁ | | Correction Factor, K ₂ | | | |
|-----------------------------------|----------------|--|-------|-------|--------|
| Shape of Pier Nose | K ₁ | Angle | L/a=4 | L/a=8 | L/a=12 |
| (a) Square nose | 1.1 | 0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| (b) Round nose | 1.0 | 15 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| (c) Circular cylinder | 1.0 | 30 | 2.0 | 2.75 | 3.5 |
| (d) Group of cylinders | 1.0 | 45 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
| (e) Sharp nose | 0.9 | 90 | 2.5 | 3.9 | 5.0 |
| | | Angle = skew angle of flow L = length of pier | | | |

| Bed Condition | Dune Height ft | K ₃ |
|-----------------------------|----------------|----------------|
| Clear-Water Scour | N/A | 1.1 |
| Plane bed and Antidune flow | N/A | 1.1 |
| Small Dunes | 10 > H ≥ 2 | 1.1 |
| Medium Dunes | 30 > H ≥ 10 | 1.2 to 1.1 |
| Large Dunes | H ≥ 30 | 1.3 |

Formulazione di Sheppard – Melville

La profondità di scalzamento attesa può essere valutata come:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{y_s}{a^*} = 2.5 f_1 f_2 f_3 \quad \text{for } 0.4 < \frac{V_1}{V_c} < 1.0 \\ \frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) + 2.5 f_3 \left(\frac{\frac{V_{1p}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{1p}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{for } 1 < \frac{V_1}{V_c} < \frac{V_{1p}}{V_c} \\ \frac{y_s}{a^*} = 2.2 f_1 \quad \text{for } \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{1p}}{V_c} \end{array} \right.$$

con

- $V_{1p} = \max(V_{1p1}; V_{1p2})$
- $V_{1p1} = 5V_c; \quad V_{1p2} = 0.6\sqrt{gy_1}$
- $V_c = \begin{cases} 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{73.5y_1}{d_{50} [Re(2.85 - 0.58 \ln(Re) + 0.002Re) + \frac{111}{Re} - 6]} \right) & \text{for } 5 \leq Re \leq 70 \\ 2.5 \cdot u^* \ln \left(\frac{2.21y_1}{d_{50}} \right) & \text{for } Re > 70 \end{cases}$
- $Re = \frac{u^* d_{50}}{2.32 \cdot 10^{-7}}; \quad u^* = \left[16.2 \cdot d_{50} \left(\frac{9.09 \cdot 10^{-6}}{d_{50}} - d_{50} (38.76 + 9.6 \ln(d_{50})) - 0.005 \right) \right]^{0.5}$

|  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">COMMESSA</th> <th style="text-align: center;">LOTTO</th> <th style="text-align: center;">CODIFICA</th> <th style="text-align: center;">DOCUMENTO</th> <th style="text-align: center;">REV.</th> <th style="text-align: center;">FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">IQ01</td> <td style="text-align: center;">01</td> <td style="text-align: center;">R 09 RI</td> <td style="text-align: center;">ID 0002 002</td> <td style="text-align: center;">B</td> <td style="text-align: center;">64 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 64 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 64 di 77 | | | | | | | | |

- $y_1 =$ tirante idrico (m)

$$f_1 = \tanh \left[\left(\frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right]; f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\}; f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)}{0.4 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{1.2} + 10.6 \left(\frac{a^*}{d_{50}} \right)^{-0.13}} \right]$$

- $a^* = K_s a_p$; $a_p = a \cdot \cos\theta + L \cdot \sin\theta$; $K_s =$

$$\begin{cases} 1 & (\text{pilacircolare}) \\ 0.86 + 0.97 \left(\left| \frac{\pi\theta}{180} - \frac{\pi}{4} \right| \right)^4 & (\text{pilarettangolare}) \end{cases}$$

(a = larghezza della pila; L = lunghezza della pila; θ = angolo di attacco [°])

Secondo gli studi condotti da Sheppard et al. (2013), riguardanti il confronto tra i valori di scalzamento osservati in laboratorio e in sito e quelli valutati secondo le più comuni ed utilizzate formule per il calcolo dello scalzamento (tra cui anche quelle di Melville, Froehlich, Breusers e CSU), **la formulazione SM** fornisce valori più attendibili (e prossimi a quelli misurati) rispetto alle altre, per i seguenti campi di valori:

$$\frac{V_1}{V_c} = 0.4 \div 7.6 \quad \frac{y_1}{a} = 0.05 \div 10 \quad \frac{a}{d_{50}} = 3.65 \div 65047 \quad FR = 0.03 \div 1.95$$

all'interno dei quali ricadono i valori dei parametri (tirante, velocità, d_{50} ,...), relativi al corso d'acqua oggetto di studio (Torrente Curone).

In generale, è possibile riscontrare quattro differenti scenari di erosione localizzata:

- CASO I: la fondazione della pila rimane al di sotto della buca erosiva;
- CASO II: la sommità della fondazione è esposta al flusso della corrente all'interno della buca erosiva;
- CASO III: la sommità della fondazione giace al di sopra del fondo alveo;
- CASO IV: la sommità della fondazione si trova al di sotto o in prossimità del pelo libero.

IDROLOGIA E IDRAULICA
Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|-------|----------|-------------|------|----------|
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 65 di 77 |

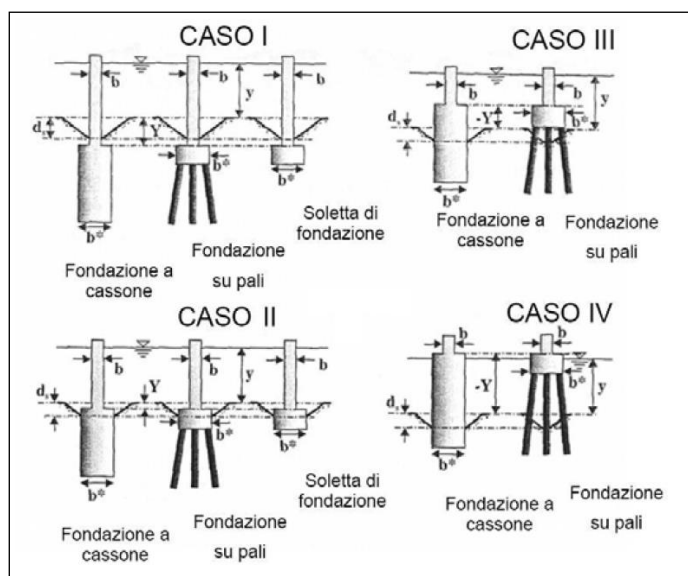


Figura 49: Differenti tipologie di pile non uniformi dotate di fondazioni.

Nel CASO I l'erosione localizzata viene calcolata facendo riferimento alla larghezza della pila b in quanto la presenza della fondazione risulta essere influente nel processo erosivo.

Nei CASI II e III invece occorre fare riferimento alla procedura di calcolo proposta da *Melville e Raudkivi (1996)* che utilizza una larghezza della pila equivalente ben definita come:

$$b_e = b \cdot \left(\frac{h_0 + Y}{h_0 + b^*} \right) + b^* \cdot \left(\frac{b^* - Y}{h_0 + b^*} \right)$$

dove h_0 : profondità media della corrente rispetto al fondo alveo; Y : altezza massima della buca erosiva; b^* : larghezza della fondazione.

Per quanto riguarda il CASO IV, infine, l'erosione localizzata può essere calcolata utilizzando come larghezza equivalente della pila la larghezza della fondazione b^* dal momento che il fenomeno interessa maggiormente la fondazione stessa.

E' stato effettuato dunque il calcolo dello scalzamento, relativo alla piena di progetto, $Tr = 200$ anni, e alla piena che si verifica mediamente ogni anno ($Tr = 1,001$), considerando dapprima le dimensioni delle pile.

Per quanto concerne il calcolo dello scalzamento per la piena $Tr = 1,001$ del Torrente Curone, si è fatto riferimento direttamente alla simulazione numerica condotta secondo il modello monodimensionale HECRAS, adottato per la fase di cantiere (per una portata di 60.5 mc/s).

| | | | | | | |
|---|---|-------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

Per quanto concerne il materiale potenzialmente erodibile sul fondo, si è fatto riferimento alle analisi granulometriche effettuate su campioni prelevati direttamente in alveo; in particolare, per il viadotto VI09, ovvero per il Torrente Curone, il materiale considerato è caratterizzato dalla seguente granulometria: $d_{50} = 10$ mm, $d_{90} = 40$ mm, che caratterizza il materiale del prelievo denominato PR06 (per maggiori dettagli, si rimanda alla relazione IQ0101R09RGID0002001A).

Nella tabella seguente si riportano i valori di scalzamento attesi per $Tr = 200$ anni (i valori dei parametri tirante idrico, h , velocità della corrente, v , e angolo di attacco della corrente, “*skew angle*” sono dedotti dalle simulazioni numeriche 2D) in corrispondenza delle pile del viadotto VI09, interessate dalla piena di progetto. Per $Tr = 1,001$ anni, nessuna pila è interessata dalla piena di riferimento.

Tabella 7- Viadotto VI09 (Torrente Curone): valori di scalzamento attesi attorno alle pile, per $Tr=200$.

| ID PILA | Forma pila | D (m) [pila] | L (m) [pila] | h (m) | v (m/s) | Skew Angle (°) | Fr () | Ys (m) Sheppard & Melville | Ys (m) CSU | Ys (m) Pila |
|---------|---------------------|-----------------|-----------------|-------|---------|-------------------|--------|----------------------------------|---------------|----------------|
| P1 | pseudo-rettangolare | 4.3 | 15.8 | 0.32 | 1.072 | 48 | 0.605 | 4.3 | 4.3 | 4.3 |
| P2 | pseudo-rettangolare | 4.3 | 15.8 | 0.545 | 2.427 | 30 | 1.050 | 5.3 | 10.8 | 10.8 |
| P3 | pseudo-rettangolare | 4.3 | 15.8 | 0.556 | 1.591 | 65 | 0.681 | 5.8 | 8.5 | 8.5 |
| P4 | pseudo-rettangolare | 4.3 | 15.8 | 0.354 | 0.7 | 86 | 0.376 | 4.4 | 5.6 | 5.6 |
| P5 | pseudo-rettangolare | 4.3 | 15.8 | 0.47 | 0.7 | 52 | 0.326 | 4.0 | 5.5 | 5.5 |

Confrontando i valori di scalzamento atteso con quelli di ricoprimento dei plinti di fondazione (1.2 m per la pila P1; 5.6 m per la pila P2; 4.9 m per la pila P3; 1.5 m per la pila P4; 1.3 m per la pila P5) si evince che in corrispondenza delle pile del VI09 i fenomeni di erosione (innescati dalla piena $Tr=200$ anni) possono interessare anche le fondazioni (scalzamento atteso maggiore del ricoprimento).

Pertanto, il calcolo è stato ripetuto considerando le dimensioni equivalenti del sistema “*pila – plinto*”, valutate con la formulazione proposta da Melville e Raudkivi (1996), precedentemente introdotta (per le pile P2-P3 si prevede la realizzazione di fondazioni “*plinto su pali*” di dimensioni 16.5 m x 16.5 m; per le rimanenti pile si prevede la realizzazione di fondazioni “*plinto su pali*” di dimensioni 12 m x 16.5 m).

| | | | | | | |
|---|---|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

Di seguito, i valori definitivi di scalzamento, per le pile del nuovo *viadotto VI09* interessate dalla piena di riferimento del T. Curone, da considerare nel dimensionamento delle relative fondazioni.

Tabella 8- Viadotto VI09 (Torrente Curone): valori di scalzamento attesi attorno al sistema “pila-fondazione”, per Tr200.

| ID PILA | B (m) [plinto] | L (m) [plinto] | Deq (m) | Leq (m) | Ys (m) Sheppard & Melville | Ys (m) CSU | Ys (m) Pila-Plinto |
|---------|----------------|----------------|---------|---------|----------------------------------|---------------|-----------------------|
| P1 | 12.0 | 16.5 | 11.05 | 16.44 | 4.6 | 5.5 | 5.50 |
| P2 | 16.5 | 16.5 | 12.10 | 16.25 | 6.8 | 14.7 | 14.70 |
| P3 | 16.5 | 16.5 | 12.60 | 16.28 | 6.50 | 10.00 | 10.00 |
| P4 | 12.0 | 16.5 | 10.84 | 16.42 | 4.50 | 5.80 | 5.80 |
| P5 | 12.0 | 16.5 | 10.91 | 16.43 | 4.50 | 6.60 | 6.60 |

Anche le spalle del nuovo VI09 risultano interessate dall'esonazione della piena con $Tr = 200$ anni del T. Curone. Per la valutazione dello scalzamento atteso in corrispondenza delle spalle, si è fatto riferimento alla metodologia della FHWA. In particolare, considerato lo schema riportato nella figura seguente, si definiscono le seguenti variabili:

- θ = angolo compreso tra la direzione principale della corrente e l'asse dell'opera di attraversamento
- L = lunghezza di influenza della spalla/rilevato di approccio

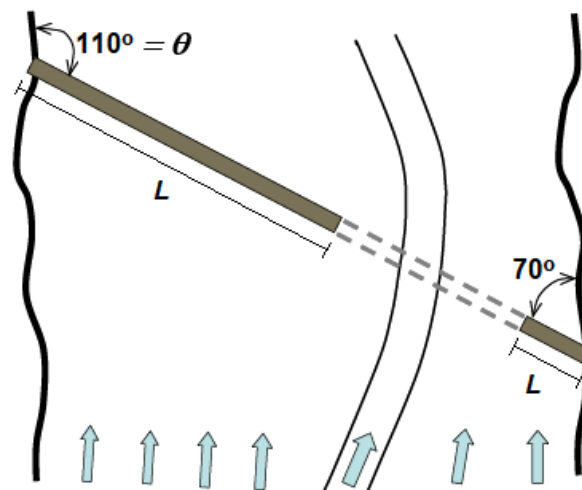


Figura 50: Calcolo dello scalzamento in corrispondenza delle spalle: definizione dei parametri.

| | | | | | | |
|---|---|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

Determinate tali variabili, in relazione al valore della quantità L'/Y_1 ($L' = L \cdot \cos(90-\theta)$; Y_1 = altezza della corrente in corrispondenza della spalla), si procede al calcolo dello scalzamento mediante le formulazioni di Froehlich e di Hire, in accordo alle seguenti indicazioni:

$$\begin{cases} \frac{L'}{Y_1} \leq 25 \rightarrow \text{Froehlich} \\ \frac{L'}{Y_1} > 25 \rightarrow \text{Hire} \end{cases}$$

Formulazione di Froehlich

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{L'}{Y_1} \right)^{0.43} FR^{0.61} + 1$$

con $K_1 = 0.82$, $K_2 = (\theta/90)^{0.13}$, FR = numero di Froude.

Formulazione di Hire

$$\frac{Y_s}{Y_1} = 4FR^{0.33} \frac{K_1}{0.55} K_2$$

K_1 e K_2 , come sopra definiti.

Di seguito, i risultati ottenuti (i valori delle variabili idrauliche sono estratti dalle simulazioni numeriche secondo modello 2D, per la “portata di progetto”, $Tr200$).

| ID Spalla | L [m] | θ (°) | h (m) | v (m/s) | Ys (m) |
|--------------------|-------|--------------|-------|---------|------------|
| SPA (lato Tortona) | 50 | 132 | 0.32 | 1.072 | 1.7 |
| SPB (lato Voghera) | 260 | 128 | 0.47 | 0.70 | 2.0 |

I valori di scalzamento atteso attorno alle spalle è poco significativo ai fini delle verifiche di sicurezza delle relative fondazioni. Per maggiori dettagli, si rimanda comunque agli elaborati specialistici di geotecnica.

| | | | | | | |
|---|---|------------------|-------------|---------------------|--------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

Si è proceduto alla valutazione dello scalzamento anche attorno alle pile e alle spalle del nuovo cavalcaferrovia IV02.

Collocandosi ai margini delle aree di esondazione ed essendo interessato da modesti valori di tirante e velocità, si è proceduto al calcolo dello scalzamento atteso attorno alle pile prendendo a riferimento i valori delle variabili idrauliche della pila più sollecitata (i.e. P2).

Applicando la medesima procedura sopra descritta, per l'opera IV02, si ha uno scalzamento massimo pari a:

Tabella 9- Opera IV02: valori di scalzamento massimo attesi attorno alle pile, per Tr200.

| ID PILA | Forma pila | D (m) [pila] | L (m) [pila] | h (m) | v (m/s) | Skew Angle (°) | Fr () | Ys (m) Sheppard & Melville | Ys (m) CSU | Ys (m) Pila |
|----------------------|---------------------|--------------|--------------|-------|---------|----------------|--------|----------------------------|------------|-------------|
| P2 (più sollecitata) | pseudo-rettangolare | 2 | 5 | 1.6 | 0.5 | 30 | 0.126 | 0.0 | 2.1 | 2.1 |

Tabella 10- Opera IV02: valori di scalzamento massimo attesi attorno al sistema "pila-fondazione", per Tr200.

| ID PILA | h (m) | v (m/s) | Skew Angle (°) | Fr () | B (m) [plinto] | L (m) [plinto] | Ys (m) Pila-Plinto |
|----------------------|-------|---------|----------------|--------|----------------|----------------|--------------------|
| P2 (più sollecitata) | 1.6 | 0.5 | 30 | 0.126 | 9.8 | 9.2 | 3.90 |

Anche le spalle del nuovo IV02 risultano interessate dall'esondazione della piena con $Tr = 200$ anni del T. Curone. Pertanto, valutando lo scalzamento atteso secondo le formulazioni (Froehlich/Hire) sopra introdotte, per le spalle dell'IV02, si ha:

| ID Spalla | θ (°) | L (m) | Y1 (m) | V1 (m/s) | Ys (m) |
|-----------|--------------|-------|--------|----------|-------------|
| spA | 170 | 150 | 1.4 | 0.2 | 1.70 |
| spB | 90 | 40 | 1.3 | 0.1 | 2.40 |

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 70 di 77 |

7 OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA

Si è proceduto al dimensionamento delle opere di sistemazione/protezione idraulica sul T. Curone, atte a mantenere o ripristinare la sezione d'alveo in una configurazione (attuale o di progetto) inalterata e quindi proteggerla da possibili fenomeni di erosione, dopo i rimaneggiamenti dovuti alle fasi di realizzazione del nuovo viadotto VI09 (e della nuova opera IV02) e a contribuire alla stabilità dell'alveo inciso in corrispondenza delle opere di attraversamento in progetto.

Sul T. Limbione non sono previste opere di sistemazione in quanto il VI10 scavalca completamente l'alveo inciso e le arginature, queste ultime non interessate comunque dalle lavorazioni necessarie per la realizzazione delle spalle del nuovo viadotto, opportunamente presidiate da opere provvisoriale (e.g. palancole).

Sul Torrente Curone si prevede la realizzazione di opportune opere di protezione in massi sciolti/legati attorno a pile e spalle, interessate dalla piena di progetto (Tr200).

Per il dimensionamento delle opere di protezione attorno alle pile è stata adottata la seguente formulazione (FHWA, 2009), che consente di tenere conto (tramite opportuni coefficienti correttivi) anche di eventuali vortici che possono generarsi, localmente, attorno agli "ostacoli" (rappresentati dalle pile stesse) presenti in alveo:

$$d_{50} = \frac{0.692 \cdot (V_{des})^2}{(S_g - 1)2g}$$

in cui d_{50} = diametro medio dei massi (m); V_{des} = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s); S_g = peso specifico dei massi (t/m^3). La velocità di progetto deve rappresentare le condizioni nelle immediate vicinanze delle pile. Qualora si dovesse adottare un valore medio di velocità, questo deve essere opportunamente moltiplicato per i fattori che sono funzione della forma della pila e della sua posizione rispetto all'alveo:

$$V_{des} = K_1 K_2 V_{avg}$$

Se si dispone di una distribuzione di velocità risultante da modello fisico o da calcolo idraulico 1D o 2D, allora si può utilizzare solamente il coefficiente della forma della pila. Sarebbe opportuno considerare il valore massimo della velocità nell'alveo attivo V_{max} , dal momento che l'alveo stesso può spostarsi nel tempo e la massima velocità impatterebbe le pile:

$$V_{des} = K_1 V_{max}$$

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 71 di 77 |

in cui V_{des} = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s); K_1 = fattore di forma pari a 1,5 per pile circolari “round-nose” o 1,7 per pile a spigoli vivi; K_2 = fattore di correzione della velocità per l’ubicazione nell’alveo (varia da 0,9 per pile vicino alle sponde in alveo rettilineo, fino a 1,7 per pile immerse nel filone principale della corrente); V_{avg} = velocità media nell’alveo in corrispondenza del ponte (m/s); V_{max} = velocità massima nell’alveo attivo (m/s).

Considerando per le pile di scavalco (P2, P3) del VI09 i parametri: $V_{max} = 2.4$ m/s (per $Tr = 200$ anni), $S_g = 2.2$ t/m³; $K_1 = 1.7$, si ottiene un diametro medio dei massi pari a $d_{50} = 1.0$ m. A vantaggio di sicurezza, se ne prevede anche la legatura con funi di acciaio. Considerando invece per le rimanenti pile i parametri: $V_{max} = 1$ m/s (per $Tr = 200$ anni), $S_g = 2.2$ t/m³; $K_1 = 1.7$, si ottiene un diametro medio dei massi pari a $d_{50} = 0.30$ m.

Considerando invece per le pile dell’IV02 i parametri: $V_{max} = 0.5$ m/s (per $Tr = 200$ anni), $S_g = 2.2$ t/m³; $K_1 = 1.7$, si ottiene un diametro medio dei massi pari a $d_{50} = 0.1$ m. Si adotta comunque un diametro medio minimo dei massi pari a $d_{50} = 0.30$ m.

Per maggiori dettagli, si rimanda agli elaborati grafici annessi cod. IQ0101R09PZID0002003, IQ0101R09BZID0002001.

Si precisa che per i torrenti in esame sono state sviluppate anche analisi riguardanti i fenomeni *trasporto solido* (erosione/deposizione) che tendenzialmente si manifestano lungo i tratti fluviali oggetto di intervento, volte alla valutazione degli effetti delle sistemazioni idrauliche (nel caso specifico quelle previste sul T. Curone) sulla tendenza evolutiva dell’alveo.

Per maggiori dettagli, si rimanda alla relazione annessa cod. IQ0101R09RGID0002001A.

| | | | | | | |
|--|---|-------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| | IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B |

8 CONSIDERAZIONI SUGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Con riferimento allo studio idrologico annesso (rif. IQ0101R09RIID0001001A), ed in particolare ai dati di pioggia registrati presso la stazione pluviometrica di Voghera, per effetto dei cambiamenti climatici nel periodo 2061-2090 si prevede (sulla base dell'elaborazione dei risultati dei modelli meteorologici sviluppati dall'IPCC) un incremento massimo delle precipitazioni, e quindi delle portate al colmo, pari al **+23%**.

Applicando tale incremento alle portate di progetto (“*idrologiche*” ad oggi stimate con $Tr = 200$ anni, secondo Gumbel) dei corsi d'acqua Torrente Curone e Torrente Limbione, si ottengono valori di portata di progetto nel periodo 2061-2090 prossimi a quelli delle portate al colmo ($Tr200$) derivanti dall'applicazione delle LSPP elaborate statisticamente secondo GEV, nello specifico:

- *Torrente Curone: 532.60 mc/s*
- *Torrente Limbione: 113.70 mc/s*

Applicando tali valori di portata nei modelli numerici monodimensionali sopra descritti, nello scenario ipotetico “post operam” futuro di sistemazione idraulica del territorio, si ottengono, in corrispondenza delle opere in progetto VI09 (T. Curone) e VI10 (T. Limbione) in esame, i seguenti valori di livello idrico e franco idraulico.

| | Quota minima impalcato [m slm] | Livello di piena Tr200 [m slm] -1D | Franco sul livello idrico TR200 [m] |
|---------------------------|---------------------------------------|---|--|
| VI09 (T. Curone) | +101.30 | 98.70 | +2.60 |
| VI10 (T. Limbione) | +98.80 | 97.80 | +1.00 |

Sulla base delle proiezioni climatiche ad oggi disponibili, le opere previste in progetto garantirebbero (al 2090) il passaggio a pelo libero delle “*portate di riferimento/progetto incrementate*” per effetto dei cambiamenti climatici.

Si precisa che le analisi eseguite in questo capitolo, sulla base di portate incrementate per effetto del cambiamento climatico, sono finalizzate a verificare se le opere di attraversamento in progetto

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 73 di 77 |

consentano il transito delle piene di riferimento (a pelo libero, senza specifico franco minimo) nell'ipotesi di incremento delle precipitazioni, dedotto dalle proiezioni più cautelative (massimo scenario di emissione, massima variazione prevista, modello meteo-climatico più gravoso, massimo orizzonte temporale) ad oggi disponibili. In mancanza di una specifica normativa o linea guida di riferimento (a livello nazionale e/o locale) sul tema, si ritiene che tale criterio di verifica sia ragionevole e conforme alle indicazioni riportate nella *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (MATTM, 2015).

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 74 di 77 |

9 COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

Con riferimento alle NTC 2018, al Cap. 5 si asserisce:

“Il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d’acqua interessata dalla piena di progetto e, se arginata, i corpi arginali. Qualora fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce netta minima tra pile contigue, o fra pila e spalla del ponte, non deve essere inferiore a 40 m misurati ortogonalmente al filone principale della corrente. Nel caso di pile e/o spalle in alveo, cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle tenuto anche conto del materiale galleggiante che il corso d’acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione. Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l’intradosso delle strutture, è da assumersi non inferiore a 1.50 m, e comunque dovrà essere scelto tenendo conto di considerazioni e previsioni sul trasporto solido di fondo e sul trasporto di materiale galleggiante, garantendo una adeguata distanza fra l’intradosso delle strutture e il fondo alveo. Quando l’intradosso delle strutture non sia costituito da un’unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale.”

Con riferimento invece alla Direttiva n.2/1999 dell’Autorità di Bacino del Fiume Po, al paragrafo 3.2

“Portata di piena di progetto. Il tempo di ritorno della piena di progetto per le verifiche idrauliche del ponte deve normalmente rispettare i seguenti valori: a) per i corsi d’acqua interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali, non inferiore a quello assunto per la delimitazione della Fascia B; b) per i corsi d’acqua non interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali non inferiore a 100 anni. In casi eccezionali, quando si tratti di corsi d’acqua di piccole dimensioni e di infrastrutture di importanza molto modesta, possono essere assunti tempi di ritorno inferiori in relazione ad esigenze specifiche adeguatamente motivate; in tali situazioni è comunque necessario verificare che le opere non comportino un aggravamento delle condizioni di rischio idraulico sul territorio circostante per

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 75 di 77 |

la piena di 200 anni e definire il comportamento dell'opera stessa in rapporto alla stessa piena.....

Franco minimo. Il minimo franco tra la quota idrometrica relativa alla piena di progetto e la quota di intradosso del ponte deve essere non inferiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore a un 1.00 m; il valore del franco deve essere assicurato per almeno 2/3 della luce quando l'intradosso del ponte non sia rettilineo e comunque per almeno 40 m, nel caso di luci superiori a tale valore. Nel caso di corsi d'acqua arginati, la quota di intradosso del ponte deve essere superiore a quella della sommità arginale. Il franco minimo tra la quota idrometrica relativa alla piena di progetto e la quota di sommità del rilevato di accesso al ponte (piano viabile) deve essere non inferiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore a 1.00 m.

Posizionamento del ponte rispetto all'alveo. L'insieme delle opere costituenti l'attraversamento non deve comportare condizionamenti al deflusso della piena e indurre modificazioni all'assetto morfologico dell'alveo. nei casi in cui il ponte sia inserito in un tratto di corso d'acqua interessato da altre opere di attraversamento poste in adiacenza, a monte o a valle, è necessario che le pile in alveo (ed eventualmente le spalle) siano allineate con quelle esistenti in modo che le pile presenti, considerate congiuntamente, non riducano la luce effettiva disponibile, anche ai fini del rischio di ostruzione da parte del materiale trasportato in piena.....

Effetti idraulici indotti dal ponte. La soluzione progettuale per il ponte e per i relativi rilevati di accesso deve garantire l'assenza di effetti negativi indotti sulle modalità di deflusso in piena; in particolare il profilo idrico di rigurgito eventualmente indotto dall'insieme delle opere di attraversamento deve essere compatibile con l'assetto difensivo presente e non deve comportare un aumento delle condizioni di rischio idraulico per il territorio circostante.....”

I nuovi viadotti ferroviari previsti sul Torrente Curone e sul Torrente Limbione sono caratterizzati da luci e franchi nel rispetto della normativa vigente. E' rispettato il franco minimo di 1,5 metri nei confronti del livello idrico corrispondente alla piena di progetto (Tr200, "idrologica"), la luce minima netta (40 metri) in direzione ortogonale alla corrente per pile contigue in alveo interessate dalla piena di riferimento, nonché la distanza minima tra fondo alveo e intradosso dell'impalcato (6-7 metri, come riportato nella circolare applicativa n.7/2019 delle NTC2018), nell'eventualità che la

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA | | | | | |
| IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 | CODIFICA R 09 RI | DOCUMENTO ID 0002 002 | REV. B | FOGLIO 76 di 77 |

sezione di attraversamento sia interessata dal transito di materiali galleggianti di non trascurabili dimensioni.

Inoltre, le opere in progetto non costituiscono un elemento pregiudizievole all'attenuazione o all'eliminazione delle specifiche cause di rischio idraulico esistenti sul territorio, garantendo proprio il transito in sicurezza della cosiddetta "*portata idrologica*", attualmente impedito dalle opere di attraversamento esistenti, presenti a monte, e dalla scarsa officiosità idraulica della sezione di deflusso dei torrenti in esame (rif. DPCM 29.09.1998 e s.m.i.).

In definitiva, è dimostrata la compatibilità idraulica delle opere di attraversamento in progetto, nonché dell'infrastruttura ferroviaria nel suo complesso, nel tratto *Pontecurone-Voghera*, oggetto di studio nella presente relazione.

|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA</p> | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|-------------|----------|-----------|------|--------|------|----|---------|-------------|---|----------|
| <p>IDROLOGIA E IDRAULICA Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei Torrenti Curone e Limbione</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IQ01</td> <td>01</td> <td>R 09 RI</td> <td>ID 0002 002</td> <td>B</td> <td>77 di 77</td> </tr> </tbody> </table> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 77 di 77 |
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO | | | | | | | | |
| IQ01 | 01 | R 09 RI | ID 0002 002 | B | 77 di 77 | | | | | | | | |

10 BIBLIOGRAFIA

Pestana, R., Matias, M., Canelas, R., Araújo, A., Roque, D., Van Zeller, E., Trigo-Teixeira, A., Ferreira, R., Oliveira, R., Heleno, S., Calibration of 2D hydraulic inundation models in the floodplain region of the Lower Tagus River, 2013

Supplemento ordinario n. 8 alla GAZZETTA UFFICIALE Serie generale - n. 42, CAPITOLO 5, PONTI, 2018