

INDAGINI IDROLOGICHE IDRAULICHE DI SUPPORTO AL PIANO STRUTTURALE INTERCOMUNALE DEI COMUNI DI PISA E DI CASCINA

ALLEGATO 2 MODELLO 2 PISA SUD RELAZIONE DI SINTESI

COMMITTENTE:



Comune di Pisa
Via degli Uffizi, 1
56100 Pisa

Comune di Cascina
Corso Matteotti, 90
56021 Cascina



PROGETTISTI:

ING. GIACOMO GAZZINI

CODICE ELABORATO:

PROGETTO	LOTTO	FASE	DOC	ELABORATO	REV
L 7 3 7	0 1	S 0 2	T	R I I 2	A

REV.

DATA EMISSIONE

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

A

MARZO 2020

G.GAZZINI

G.GAZZINI

G.GAZZINI

Approfondimento del quadro conoscitivo della pericolosità idraulica relativa al reticolo secondario con riferimento alla porzione a sud del fiume Arno del territorio del Comune di Pisa



Comune di Pisa

Relazione Tecnica

Agosto 2019

This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)





INDICE

1	Premessa	1
2	Studi pregressi e dati utilizzati	4
3	Inquadramento territoriale e della pericolosità idraulica del Comune di Pisa	5
3.1	Inquadramento territoriale.....	5
3.2	Il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA)	8
4	Sopralluogo	11
5	Rilievo di dettaglio	17
6	Analisi idrologica	20
7	Analisi idraulica.....	25
7.1	Approccio modellistico generale	25
7.2	Definizione del dominio di studio.....	26
7.2.1	Estensione del dominio di studio	26
7.2.2	Schematizzazione del dominio di studio in MIKE FLOOD	28
7.3	Schematizzazione dell'alveo dei canali oggetto di studio.....	29
7.3.1	Geometria delle sezioni trasversali	29
7.3.2	Scabrezza idraulica	31
7.3.3	Condizioni al contorno.....	32
7.4	Messa a punto del modello bidimensionale.....	34
7.4.1	Costruzione della griglia di calcolo.....	34
7.4.2	Definizione dei parametri idrodinamici	41
7.5	Accoppiamento modelli 1D-2D	43
7.6	Risultati delle simulazioni idrauliche.....	43
7.6.1	Evento con tempo di ritorno 30 anni	43
7.6.2	Evento con tempo di ritorno 200 anni.....	46
8	Conclusioni.....	50

ALLEGATI

ALLEGATO A

Tabelle delle grandezze idrodinamiche in alveo

ALLEGATO B

Mappe di tiranti idrici e velocità di scorrimento nel dominio 2D

ALLEGATO C – MIKE HYDRO RIVER

Descrizione tecnica

ALLEGATO D – MIKE 21 HD

Descrizione tecnica

1 Premessa

Il presente elaborato descrive le attività svolte da DHI S.r.l. in merito all'affidamento da parte dell'Amministrazione Comunale di Pisa, Direzione Piano Strutturale di Area e Pianificazione Sovracomunale – Politiche della Casa – Ambiente – Edilizia Privata, secondo quanto deliberato con Determinazione Dirigenziale n° 1199 del 04/12/2018, del servizio di "Analisi e valutazione tecnica per approfondimento del quadro conoscitivo relativo alla pericolosità idraulica della porzione a sud del fiume Arno, Comune di Pisa, relativamente al reticolo secondario e manutenzione adeguativa della piattaforma modellistica di analisi e gestione del rischio idraulico".

Il suddetto incarico si configura come un ulteriore passo da parte dell'Amministrazione verso una completa e dettagliata conoscenza della pericolosità idraulica del proprio territorio, determinata mediante il supporto degli strumenti modellistici in dotazione. Tale conoscenza risulta indispensabile per un efficace svolgimento delle proprie attività istituzionali quali la programmazione degli interventi, la pianificazione urbanistica, la gestione della sicurezza del territorio e la protezione delle persone e dei beni.

In dettaglio, la pericolosità idraulica nel particolare contesto del Comune di Pisa presenta una pluralità di origini, conseguentemente alla presenza di un reticolo idrografico, naturale e artificiale, particolarmente complesso che comprende il fiume Arno, il suo scolmatore, ulteriori corsi d'acqua minori, il reticolo di bonifica ed una estesa rete di drenaggio locale e fognatura. Ognuna di queste componenti è potenzialmente causa di fenomeni di allagamento al variare della tipologia ed intensità delle precipitazioni.

Attraverso indagini e studi precedenti, l'Amministrazione si è dotata di una propria piattaforma modellistica integrata che, allo stato attuale, consente l'analisi e la simulazione solo di alcune tipologie di fenomeni di allagamento, quelle relative al reticolo principale (fiume Arno e canale Scolmatore) e, per un primo sito pilota, quelle per effetto di fenomeni di allagamento localizzato conseguenti ad insufficienze della rete di drenaggio, spesso causa di problematiche negli ultimi anni. In particolare, il sito pilota precedentemente individuato riguarda la porzione di territorio comunale posta a sud del fiume Arno, caratterizzata da criticità idrauliche maggiormente significative.

Tuttavia, delle tipologie di reticolo idrografico presente nel territorio pisano, ad oggi non risultano ancora schematizzate, all'interno della piattaforma, le dinamiche relative al reticolo secondario e di bonifica, di cui è parimenti necessario l'approfondimento per le finalità precedentemente descritte. L'incarico affidato per la redazione del presente studio permette pertanto all'Amministrazione, a partire dal sito pilota di Pisa sud precedentemente definito, di integrare il quadro conoscitivo relativo alla pericolosità idraulica anche secondo quest'ultima componente del reticolo idrografico.

In dettaglio l'Amministrazione ha ritenuto adeguato, per la valutazione della pericolosità idraulica complessiva relativa al reticolo secondario del sito pilota di Pisa sud, focalizzare l'attenzione sui principali canali ivi presenti, che sono pertanto l'oggetto del presente studio idraulico: il Canale Navigabile dei Navicelli e il sistema di canali, tra loro reciprocamente connessi, composto da Fossa Chiara, Fosso Caligi e Fosso di Titignano.

Al riguardo è opportuno precisare come tutti i corsi d'acqua citati confluiscono infine nel Canale Scolmatore e, pertanto, le relative criticità idrauliche possono dipendere sia dagli idrogrammi di piena in essi direttamente confluenti e sia dall'interazione con le dinamiche di deflusso del relativo corpo idrico recettore.

Tale Canale Scolmatore, peraltro, era già stato oggetto di indagine da parte degli scriventi per effetto di quanto stabilito dall'Amministrazione con Determinazione Dirigenziale n° 1019 del 27/09/2016, permettendo infine al Comune, attraverso gli esiti del relativo studio idraulico, di

raggiungere un aggiornamento di dettaglio della pericolosità idraulica del proprio territorio relativamente al reticolo principale, così come definito dal PGRA (Piano di Gestione del Rischio Alluvioni) attualmente vigente.

Come precedentemente descritto, pertanto, il focus del presente studio ricade sul reticolo idrografico secondario e di bonifica composto dal Canale Navigabile dei Navicelli e il sistema di canali composto da Fossa Chiara, Fosso Caligi e Fosso di Titignano. Questi corsi d'acqua, la cui localizzazione geografica è riportata in Figura 1.1, drenano la porzione di territorio a sud della città di Pisa, confluendo infine nel Canale Scolmatore del fiume Arno.

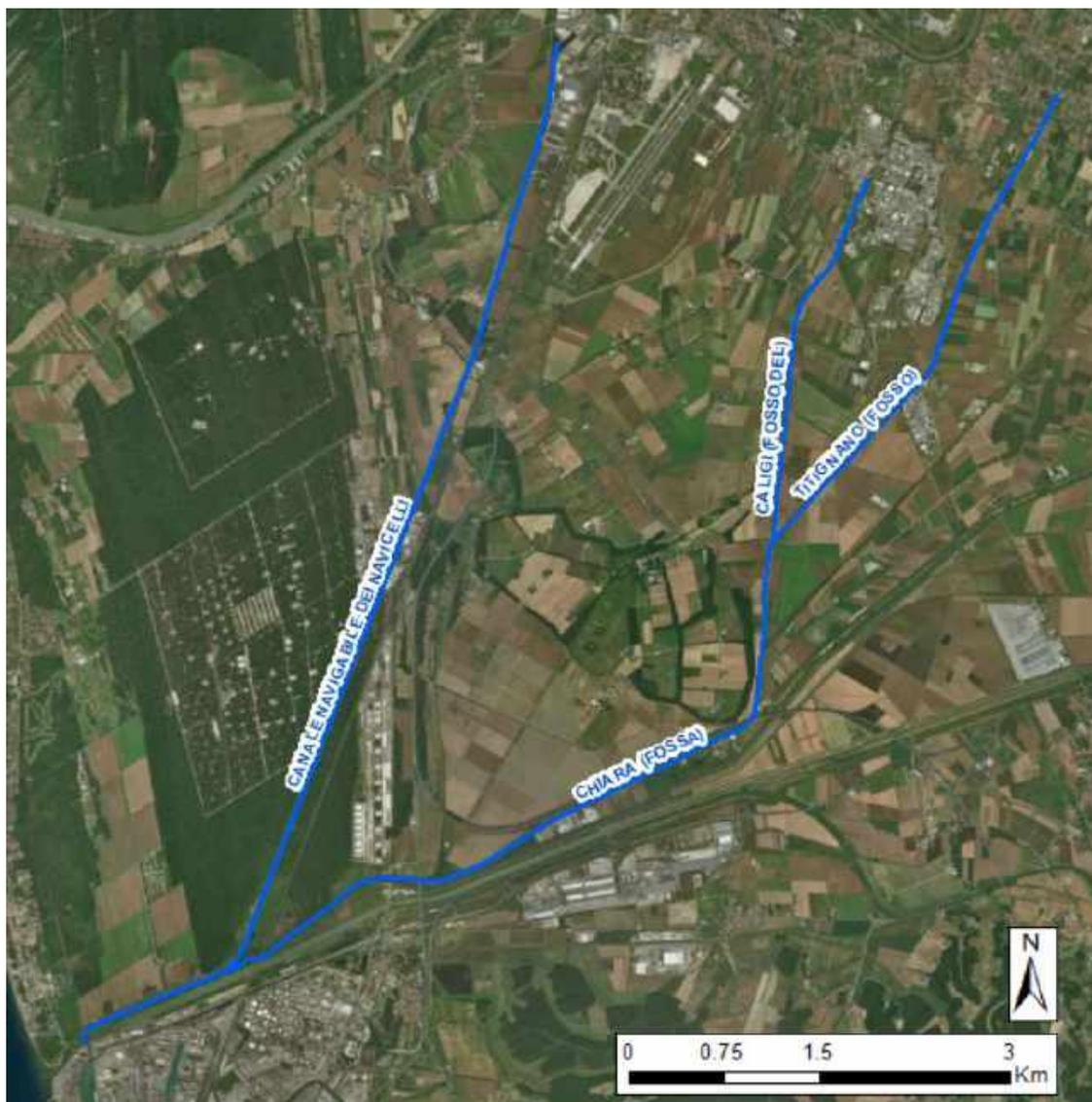


Figura 1.1 Inquadramento territoriale dei corsi d'acqua oggetto di studio.

Lo studio è stato strutturato nelle seguenti attività, presentate nei successivi capitoli.

- Raccolta e analisi degli studi pregressi e dei dati disponibili, nel Cap. 2, in termini di rilievi topografici dei corsi d'acqua e di valutazioni idrologiche delle relative portate defluenti.
- Inquadramento del territorio oggetto di studio e della relativa pericolosità idraulica, nel Cap. 3.

- Indagine preliminare dei corsi d'acqua oggetto di studio e del territorio circostante mediante specifico sopralluogo, nel Cap. 4, al fine di predisporre un piano di indagine a supporto del rilievo topografico di dettaglio, da effettuarsi a completamento dei dati disponibili.
- Svolgimento del rilievo topografico, nel Cap. 5, appositamente effettuato a completamento dei dati necessari allo svolgimento delle analisi idrauliche.
- Valutazioni idrologiche, nel Cap. 6, ad integrazione dei dati disponibili, con riferimento ai bacini idrografici afferenti al reticolo oggetto di studio e conseguente determinazione degli idrogrammi relativi agli eventi di piena trentennale e duecentennale.
- Analisi idraulica dei corsi d'acqua oggetto di studio, nel Cap. 7, attraverso l'implementazione di un modello idrodinamico 1D-2D, finalizzato a determinare le condizioni di deflusso in alveo e le esondazioni prodotte a seguito degli eventi di piena oggetto di analisi.

Le attività di analisi idraulica sono state svolte utilizzando il software MIKE FLOOD del DHI, già in dotazione al Comune di Pisa e con il quale è stata implementata negli anni precedenti la piattaforma modellistica integrata in suo possesso. MIKE FOOD è uno strumento modellistico che permette di accoppiare in maniera dinamica, attraverso un'interfaccia utente grafica, il codice monodimensionale MIKE HYDRO River e quello bidimensionale MIKE 21 (per una descrizione sintetica dei quali si rimanda agli Allegati C e D).

2 Studi pregressi e dati utilizzati

Nella prima fase di raccolta dei dati sono stati analizzati studi pregressi aventi come oggetto l'area di interesse, col fine di valutare le informazioni già disponibili ed eventualmente utilizzabili nell'ambito nel presente studio. In particolare, l'interesse si è rivolto da una parte ad eventuali analisi idrologiche pregresse che potessero fornire gli idrogrammi di piena necessari per la simulazione degli eventi trentennale e duecentennale; dall'altra, alla disponibilità di rilievi topografici in alveo sufficientemente recenti da poter essere utilizzati per l'implementazione delle sezioni trasversali all'interno del modello idrodinamico.

Per quanto riguarda gli idrogrammi di piena, tra il materiale analizzato è risultato di particolare interesse lo "Studio idrologico-idraulico a supporto del regolamento urbanistico" commissionato dal Comune di Collesalveti allo Studio Tecnico Associato di Ingegneria PR.I.MA di Livorno. Lo studio, risalente a luglio 2015, include, tra le diverse analisi, anche valutazioni di carattere idrologico sui bacini a scolo naturale della zona oggetto di studio. Risulta opportuno evidenziare come tale studio sia stato acquisito dal Comune di Pisa a seguito di preventiva validazione da parte dell'Autorità di Bacino del fiume Arno, in quanto i dati di tale studio furono considerati quale input per la realizzazione del modello idraulico del Canale Scolmatore con cui sono state redatte le fasce di pericolosità idraulica successivamente recepite nel PGRA dall'Autorità di Bacino.

In relazione alle informazioni topografiche, i tecnici del Consorzio di Bonifica 4 Basso Valdarno, soggetto gestore del reticolo di fossi e canali del territorio pisano, e quindi anche dei corsi d'acqua oggetto di studio, hanno messo a disposizione un rilievo topografico effettuato nel 2017 e riguardante i canali Caligi e Chiara. Per tali corsi d'acqua l'informazione topografica fornita è risultata esaustiva per l'implementazione della geometria delle sezioni e degli attraversamenti nei rispettivi modelli idraulici, mentre per il fosso Titignano nessun dato recente è risultato disponibile.

Il Canale dei Navicelli, diversamente della restante parte del reticolo secondario pisano, non è soggetto alla gestione del citato Consorzio di Bonifica, bensì alla società Navicelli di Pisa S.r.l.; tale canale infatti presenta la peculiarità di essere navigabile e di richiedere a tal fine, oltre a una specifica manutenzione del corso d'acqua, anche l'apertura dell'impalcato mobile di alcuni attraversamenti al fine di consentire il passaggio delle imbarcazioni. La Navicelli di Pisa S.r.l. è pertanto il soggetto che ha fornito le informazioni topografiche necessarie all'implementazione dei relativi modelli idraulici.

A conclusione della panoramica dei dati pregressi, è opportuno citare che per il Canale Scolmatore è risultato necessario includerne un tratto all'interno del modello idraulico complessivo dei corsi d'acqua oggetto di studio, al fine di una corretta rappresentazione delle condizioni al contorno idrauliche. A tal fine è stato pertanto acquisito il modello idraulico precedentemente implementato da DHI per conto del Comune di Pisa stesso, i cui dati di input risultano a loro volta provenire dal pregresso studio commissionato dal Comune di Collesalveti e già citato in precedenza.

3 Inquadramento territoriale e della pericolosità idraulica del Comune di Pisa

3.1 Inquadramento territoriale

Lo studio idraulico interessa la porzione di territorio del Comune di Pisa compresa tra il tratto terminale del fiume Arno e quella del suo scolmatore. Questa zona ricade nel sistema idraulico delle Bonifiche e costituisce parte del reticolo secondario del fiume Arno. Si riporta in Figura 3.1 l'estratto cartografico del sistema idraulico delle Bonifiche e del fiume Arno nel territorio del Comune di Pisa.

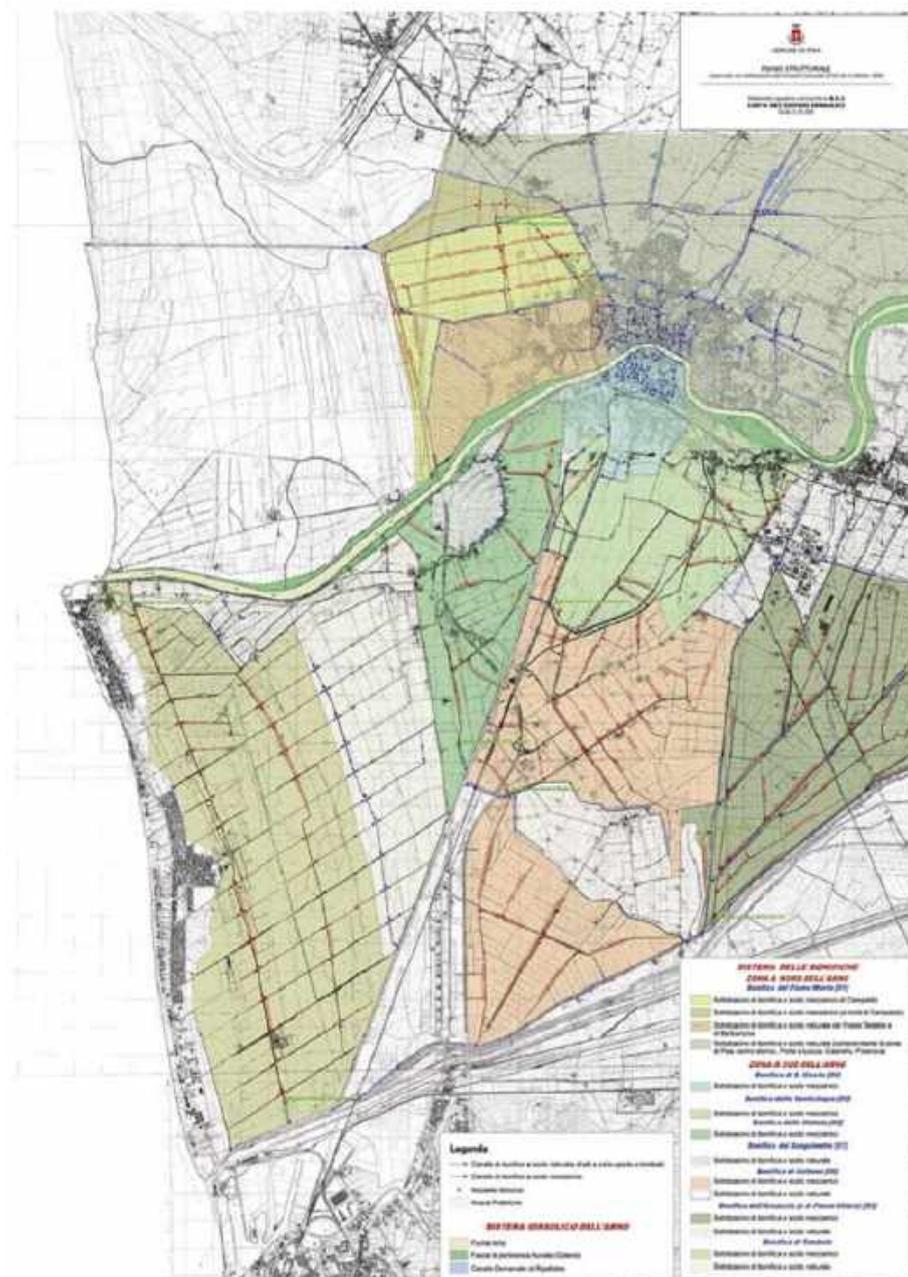


Figura 3.1 Rappresentazione cartografica del sistema idraulico dell'Arno e delle Bonifiche nel territorio del Comune di Pisa; sono evidenziate, con differenti tonalità di colore, le perimetrazioni delle Bonifiche e i principali fossi e canali del reticolo secondario.

La zona d'analisi è contraddistinta da una vasta pianura avente una debole inclinazione verso il mare e con quote altimetriche che variano da valori inferiori a -1 m s.l.m. fino a valori di circa 8-9 m s.l.m.

Il sistema idraulico delle Bonifiche è composto a sua volta da un sistema a scolo naturale e uno a scolo meccanico.

Il sistema a scolo naturale (o di "acque alte") smaltisce le acque meteoriche che provengono da zone morfologicamente più alte (in dettaglio zone di collina e dei Monti Pisani per il settore a Nord e le acque della piana di Cascina per quello a Sud dell'Arno), mentre il sistema a scolo meccanico (o di "acque basse") smaltisce, attraverso un prosciugamento per esaurimento meccanico con sollevamento all'impianto idrovoro, le acque meteoriche che ristagnano nelle parti del territorio morfologicamente più depresse, comprese le acque di falda che, localmente, sgorgano direttamente dal terreno. La bonifica idraulica per prosciugamento meccanico ha quindi la duplice funzione di allontanamento delle acque meteoriche superficiali in eccesso e di controllo della quota della falda freatica.

Sia le acque a scolo naturale che quelle a scolo meccanico, rispettivamente per deflusso naturale e per sollevamento, vengono immesse in canali ricettori detti di "acque medie", così denominati poiché possiedono una quota intermedia fra il sistema di acque alte e quello di acque basse, al fine di ricevere tali contributi nelle modalità sopradescritte.

Si riporta in Figura 3.2 il reticolo idraulico secondario del Comune di Pisa comprensivo del sistema a scolo naturale e quello a scolo meccanico.



Figura 3.2 Reticolo idraulico secondario del Comune di Pisa. In blu, reticolo a scolo naturale (acque alte); in verde, reticolo a scolo meccanico (acque basse).

I bacini a scolo meccanico ricadenti nell'area analizzata sono:

- Bonifica di La Vettola (idrovara Vettola), area di circa 9.5 km²;
- Bonifica di Coltano (idrovara Ragnaione), area di circa 25 km²;
- Bonifica di Tombolo Meridionale (idrovara Calambrone), area di circa 17.9 km²;
- Bonifica di S. Giusto (idrovara Pisa Sud), area di circa 5.4 km²;
- Bonifica di S. Giusto (idrovara Aeroporto), area di circa 9.1 km²;
- Bonifica dell'Arnaccio (idrovara Arnaccio), area di circa 23.2 km²;
- Bonifica di Padulella (idrovara Arnaccio), area di circa 0.7 km²;
- Bonifica di Biscottino (idrovara Biscottino), area di circa 0.9 km².

I relativi canali recettori sono rispettivamente:

- il Canale dei Navicelli, per le zone di bonifica di La Vettola, Coltano, Tombolo e San Giusto; il canale confluisce nello Scolmatore del fiume Arno;
- il Fossa Chiara, che recepisce le aree di bonifica di Arnaccio e Biscottino prima di immettersi nel Canale dei Navicelli;
- il Fosso del Caligi, che recepisce l'area di Padulella prima di immettersi nel Fossa Chiara.

Questi canali recepiscono a loro volta anche le acque a scolo naturale delle aree non soggette a bonifica. In particolare, è stato stimato quanto segue:

- il Canale dei Navicelli recepisce direttamente un'area a scolo naturale di circa 9 km²;
- il Fossa Chiara recepisce direttamente un'area a scolo naturale di circa 20 km²;
- il Fosso del Caligi recepisce direttamente un'area a scolo naturale di circa 12 km².

Tra i canali principali ricadenti nell'area analizzata e di maggior interesse dal punto di vista idraulico vi è anche il Fosso Titignano che raccoglie le acque alte di un'area dei circa 9 km² e le immette nel Fosso del Caligi.

I quattro canali sopra citati ricoprono un ruolo di rilevante importanza dal punto di vista idraulico nella zona delle Bonifiche e costituiscono parte preponderante del reticolo secondario nonché dello studio idraulico a seguire. Si riportano in Figura 3.3 i canali oggetto di studio contestualmente alle diverse aree di bonifica e relative idrovore.

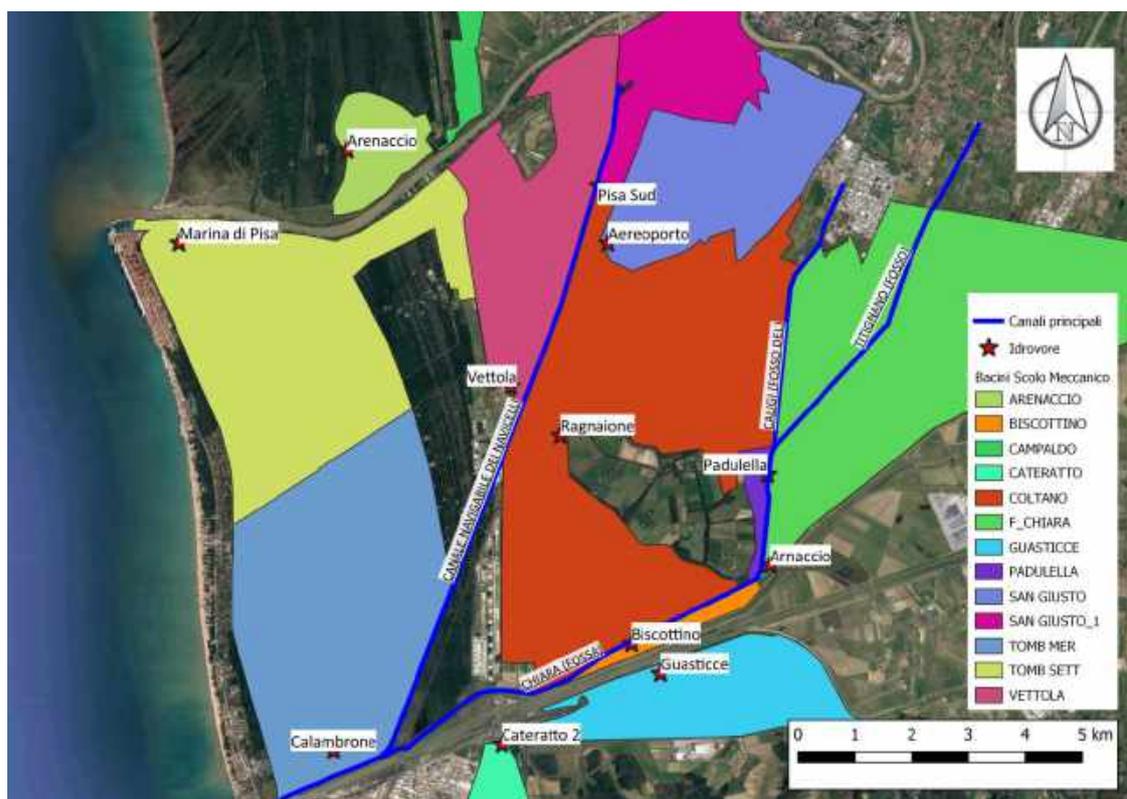


Figura 3.3 Rappresentazione dei bacini a scolo meccanico del sistema delle Bonifiche del Comune di Pisa a sud del fiume Arno con relative idrovore. In linea blu, i canali principali del reticolo secondario oggetto di studio.

3.2 Il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA)

Con le delibere del Comitato Istituzionale n. 231 e 232 del 17 dicembre 2015 è stato adottato il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del bacino del fiume Arno (nel seguito denominato PGRA) con apposizione delle misure di salvaguardia. Successivamente con delibera del C.I. n. 235 del 3 marzo 2016 il Piano è stato definitivamente approvato. Il PGRA dell'Arno sostituisce a tutti gli effetti per ciò che riguarda la pericolosità da alluvione (con una nuova cartografia, nuove norme nonché la mappa del rischio da alluvioni redatta ai sensi del D.lgs. 49/2010) il previgente PAI (Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico).

La disciplina di PGRA recepisce la Direttiva "Alluvioni" (2007/60/CE) e va a subentrare alle disposizioni previste dalle norme di PAI, con particolare riguardo ai disposti del "Capo I – Pericolosità Idraulica".

Le mappe di pericolosità e rischio di alluvioni del PGRA dell'Arno nascono dall'esperienza maturata con il PAI e ne mantengono la coerenza e i fondamenti di origine. Risultano tuttavia più approfondite sia come dati di base (ad esempio tramite l'utilizzo del LiDAR e di sezioni topografiche aggiornate) che come strumenti di calcolo (modelli più recenti e strumenti più potenti). Inoltre, risultano analizzate non solo la pericolosità dovuta alle alluvioni di tipo fluviale, ma anche quella derivante da alluvioni costiere e la pericolosità da alluvioni derivante da eventi intensi e concentrati (flash flood).

Le classi di pericolosità fluviale sono infine state riviste seguendo le indicazioni della Direttiva, rappresentando la pericolosità attraverso tre classi in funzione della frequenza di accadimento dell'evento, con pericolosità crescente all'aumentare della stessa:

- Elevata (P3), comprendente aree inondabili da eventi con tempo di ritorno $TR \leq 30$ anni;
- Media (P2), comprendente aree inondabili da eventi con tempo di ritorno $30 < TR \leq 200$ anni;
- Bassa (P1), comprendente aree inondabili da eventi con tempo di ritorno $200 < TR \leq 500$ anni.

La Figura 3.4 rappresenta la mappa di pericolosità idraulica da alluvioni di tipo fluviale definita nel PGRA per il territorio dei Comuni della Provincia di Pisa compresi tra la derivazione dello Scolmatore dell'Arno e il mare, estratta a partire dal portale web dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale (ex Autorità di Bacino del fiume Arno). La convenzione grafica adottata comporta una rappresentazione in colore blu delle aree a pericolosità elevata, in celeste di quelle a pericolosità media e infine in azzurro chiaro di quelle a pericolosità bassa.

E' opportuno evidenziare come la valutazione della pericolosità idraulica per il territorio citato, recepita nel PGRA, sia stata svolta con le stesse metodologie e strumenti di modellazione idraulica dell'analisi svolta nel presente studio.

In merito all'Autorità, è opportuno menzionare come dal 17 febbraio 2017 risultano soppresse, per espressa disposizione di legge (rif. art. 51 comma 4 della legge n. 221/2015), tutte le Autorità di bacino di cui alla legge 183/1989 e quindi anche l'Autorità di bacino del fiume Arno, sostituita dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale.

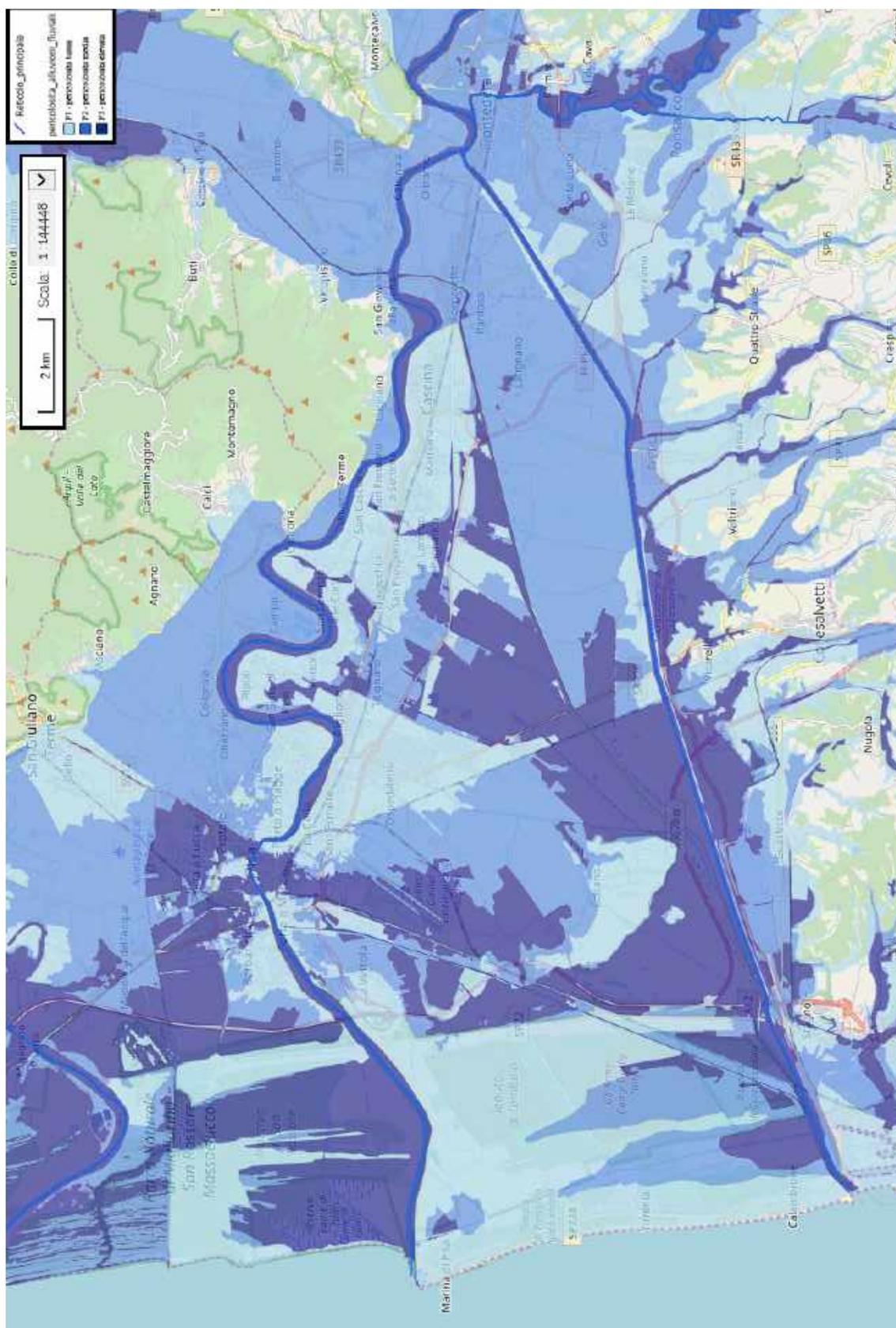


Figura 3.4 Mappa di pericolosità idraulica da alluvioni di tipo fluviale definita nel PGRA per i Comuni della Provincia di Pisa compresi tra la derivazione dello Scolmatore dell'Arno e il mare.

4 Sopralluogo

In data 15/1/2019 gli scriventi hanno effettuato un apposito sopralluogo nel territorio di Pisa sud in cui insistono i corsi d'acqua oggetto di studio. L'ispezione ha permesso di venire a diretta conoscenza della morfologia dei canali e del territorio e delle principali criticità presenti, informazioni estremamente utili nelle successive fasi di implementazione del modello e di analisi delle risultanze ottenute.

Nello specifico, durante il sopralluogo sono state investigate due diverse aree: la prima è relativa alla zona nord-ovest della frazione di Ospedaletto, attraversata da un reticolo di fossi a scolo meccanico, a tratti tombinati, aventi dimensioni molto modeste e geometria regolare, come mostrato in Figura 4.1. La seconda area ospita invece i quattro canali di maggiore rilevanza citati nel paragrafo 3.1.

L'indagine in campo del reticolo nei pressi di Ospedaletto ha permesso di constatare il generale stato di insufficienza idraulica dei fossi, con i relativi problemi di esondazione a fronte di eventi intensi. Le criticità sono principalmente dovute, oltre a sezioni localmente insufficienti, alle debolissime pendenze dei fossi, che li rendono particolarmente vulnerabili a fenomeni di rigurgito generati da profili altimetrici sfavorevoli. Nel seguito è presentata una descrizione riepilogativa di quanto constatato in fase di sopralluogo, con riferimento alla planimetria di dettaglio dell'area di Ospedaletto di cui alla Figura 4.1.

Partendo da nord, il primo fosso che si incontra è l'affluente in sinistra dell'arginone di Putignano, che raccoglie le acque reflue a partire da via delle Bocchette fino a valle della ferrovia, passando a fianco al cimitero e al campo sportivo di Putignano. Nel tratto a monte della ferrovia si nota un forte accumulo di materiale sul fondo e l'interrimento dell'imbocco della prima parte di tombinatura (Figura 4.2). Analogamente, la tombinatura al di sotto della via ferrata risulta totalmente inadeguata, più in termini di quote di fondo che di area trasversale, poiché già rigurgitata con le minime portate osservate.

Più a ovest si trova invece il fosso di Carricciola, prosecuzione del tratto tombinato di raccolta delle acque miste a monte. Nel suo primo tratto a cielo aperto le criticità risultano legate non tanto all'insufficienza della sezione trasversale, quanto ai disagi derivanti dal deflusso di acque reflue in prossimità delle abitazioni, per cui è in fase di valutazione da parte del gestore un eventuale prolungamento verso valle della tombinatura. Nel tratto che precede l'incrocio con la strada di grande comunicazione Firenze-Pisa-Livorno (nel seguito abbreviata con l'acronimo FI.PI.LI.) è presente una doppia tombinatura circolare, con sezione inadeguata al deflusso poiché rigurgitata (Figura 4.3). In corrispondenza dell'attraversamento della FI.PI.LI., invece, è presente uno scatolare che, a causa delle quote troppo alte a cui è stato realizzato e delle pendenze quasi nulle del fosso, provoca il rigurgito delle acque verso monte (Figura 4.4). I restanti fossetti più a valle convogliano le acque nel fosso di S.Ermete, che prosegue verso l'idrovora dell'aeroporto.

Il reticolo di dettaglio fin qui descritto non è l'oggetto dell'analisi idraulica di cui al presente studio e non è pertanto stato oggetto di modellazione, quanto piuttosto di un'analisi preliminare volta a identificare le cause di fondo delle criticità presenti. Qualora fosse interesse dell'Amministrazione svolgere un'analisi di dettaglio, così come valutare eventuali interventi progettuali di sistemazione idraulica, sarà preventivamente necessario lo svolgimento di un rilievo topografico di dettaglio, volto a identificare geometrie delle sezioni e pendenze del complesso reticolo di fossi presente. In fase di rilievo una particolare attenzione dovrà essere rivolta ai tratti tombinati, risultando sia di difficile accesso ed ispezione, sia particolarmente affetti da fenomeni di sedimentazione che ne hanno comportato in molti casi una significativa riduzione di sezione, con le relative conseguenze idrauliche in termini di deflusso delle acque in caso di eventi meteorici intensi.

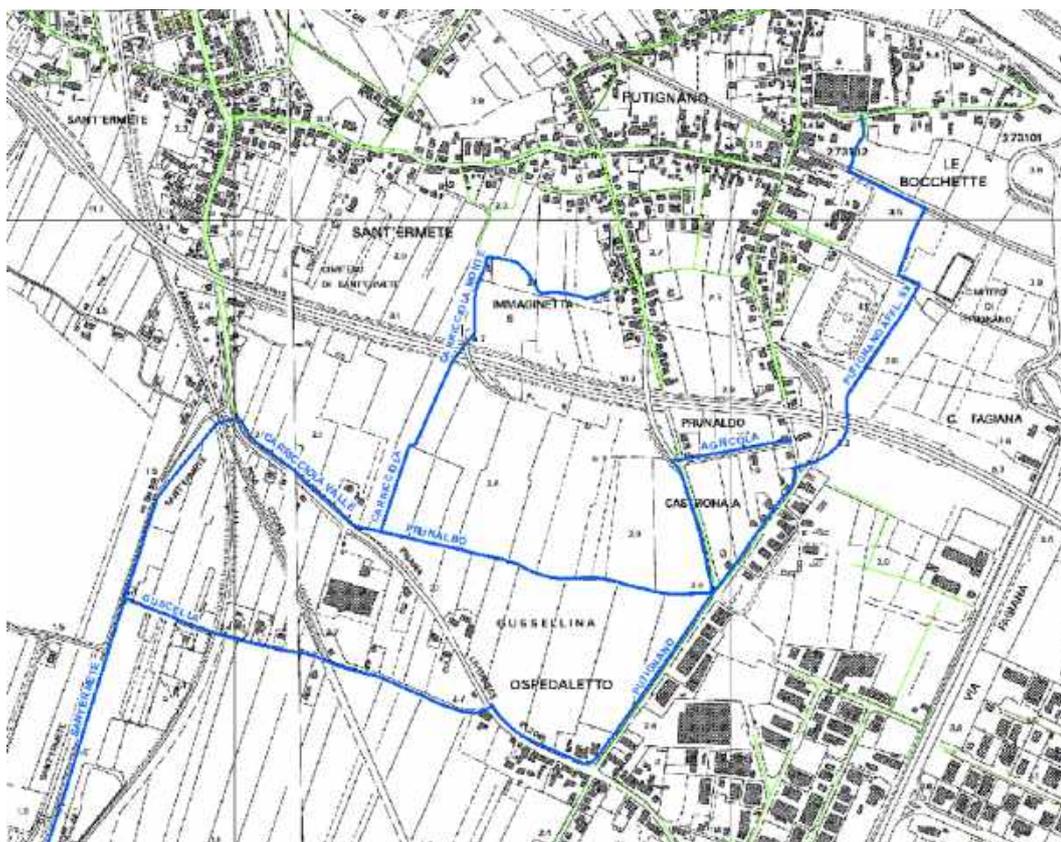


Figura 4.1 Reticolo dei fossi minori a nord-ovest di Ospedaletto, rappresentato in colore blu, ispezionato durante il sopralluogo ma escluso dalla modellazione idraulica.



Figura 4.2 Interrimento dell'imbocco della prima parte di tombinatura dell'Arginone di Putignano in zona Le Bocchette, a monte della ferrovia.



Figura 4.3 Doppia tombinatura presente sul fosso di Carriciola, affetta da evidenti problemi di rigurgito.



Figura 4.4 Apertura dello scolare al di sotto della FI-PI-LI, le cui quote troppo elevate causano il rigurgito delle acque verso monte.

Relativamente alla seconda area ispezionata, inerente ai canali principali ed oggetto di modellazione idraulica, il sopralluogo ha permesso di raccogliere elementi utili ai fini della redazione del piano d'indagine a supporto del rilievo da realizzare sul fosso Titignano, permettendo una prima valutazione sulle metodologie di rilevamento più adeguate e identificando attraversamenti e altre sezioni caratteristiche su cui raccogliere informazioni.

Si riportano da Figura 4.5 a Figura 4.9 alcune immagini reperite durante il sopralluogo e rappresentative dei corsi d'acqua oggetto di studio.



Figura 4.5 Canale Navigabile dei Navicelli nel suo tratto a monte del ponte di Via Livornese.



Figura 4.6 Tratto del fosso Titignano a monte del ponte di via Emilia.



Figura 4.7 Ponte sul fosso Caligi in prossimità della confluenza col fosso Titignano.

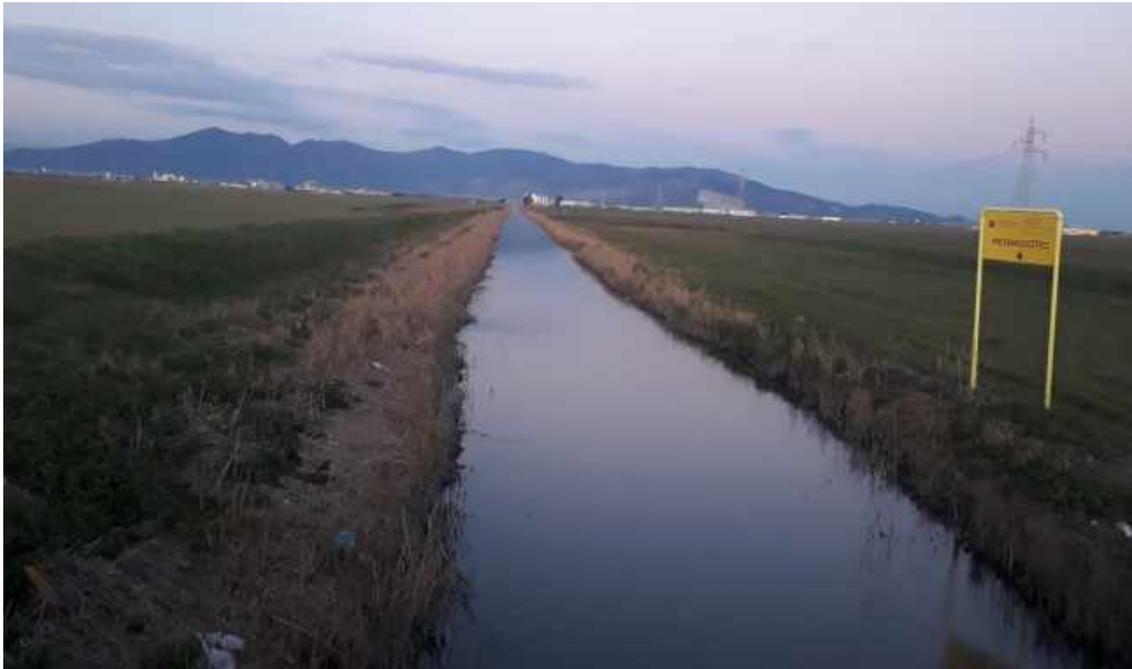


Figura 4.8 Vista verso monte del fosso Caligi in prossimità della confluenza col fosso Titignano.



Figura 4.9 Vista verso monte della fossa Chiara dal ponte della SS1.

5 Rilievo di dettaglio

A seguito della revisione degli studi e dati pregressi, che ha evidenziato la necessità dello svolgimento di un rilievo topografico per reperire le caratteristiche geometriche del fosso Titignano, e successivamente alla predisposizione del relativo piano di indagine, è stata realizzata una campagna di rilievo topografico di dettaglio del succitato fosso, unico tra quegli oggetto di studio di cui non si disponeva delle necessarie informazioni geometriche per l'implementazione del relativo modello idraulico.

Il rilievo delle sezioni selezionate nel Piano di Indagine è stato svolto nel mese di Febbraio 2019. Esso è stato condotto con sistema di posizionamento GPS per le aree con adeguato battente idrico e buona copertura del segnale dei satelliti. Nelle aree per cui quest'ultima non è risultata ottimale, ad esempio in prossimità dei ponti, si è fatto ricorso all'utilizzo di una stazione totale per il rilievo di precisione della posizione planimetrica dei punti battuti. La restituzione è avvenuta agganciando le sezioni in coordinate ed in quota al DTM LIDAR messo a disposizione dell'Amministrazione Comunale e i valori delle coordinate dei punti battuti sono stati determinati tramite trasformazione con grigliato ITALGEO2005 dell'I.G.M.

In totale, la campagna di rilievo ha portato al rilevamento di 108 sezioni sul fosso Titignano, di cui 23 in corrispondenza degli attraversamenti presenti. In aggiunta, sono state rilevate anche 4 sezioni sul fosso Caligi in corrispondenza della confluenza con il fosso Titignano, utili per un confronto col rilievo già in possesso, precedentemente citato nel Capitolo 2, al fine di verificare la coerenza altimetrica tra i profili dei due corsi d'acqua, condizione essenziale per una corretta rappresentazione del relativo comportamento idraulico. In Figura 5.1 e Figura 5.2 si riportano la planimetria generale e di dettaglio delle sezioni rilevate, mentre in Figura 5.3 si riporta un esempio di sezione oggetto di rilievo nel suo formato di restituzione.

Tutto il materiale relativo alla campagna di rilievo descritta costituisce l'elaborato di consegna avente codice 22802448-01-00100.

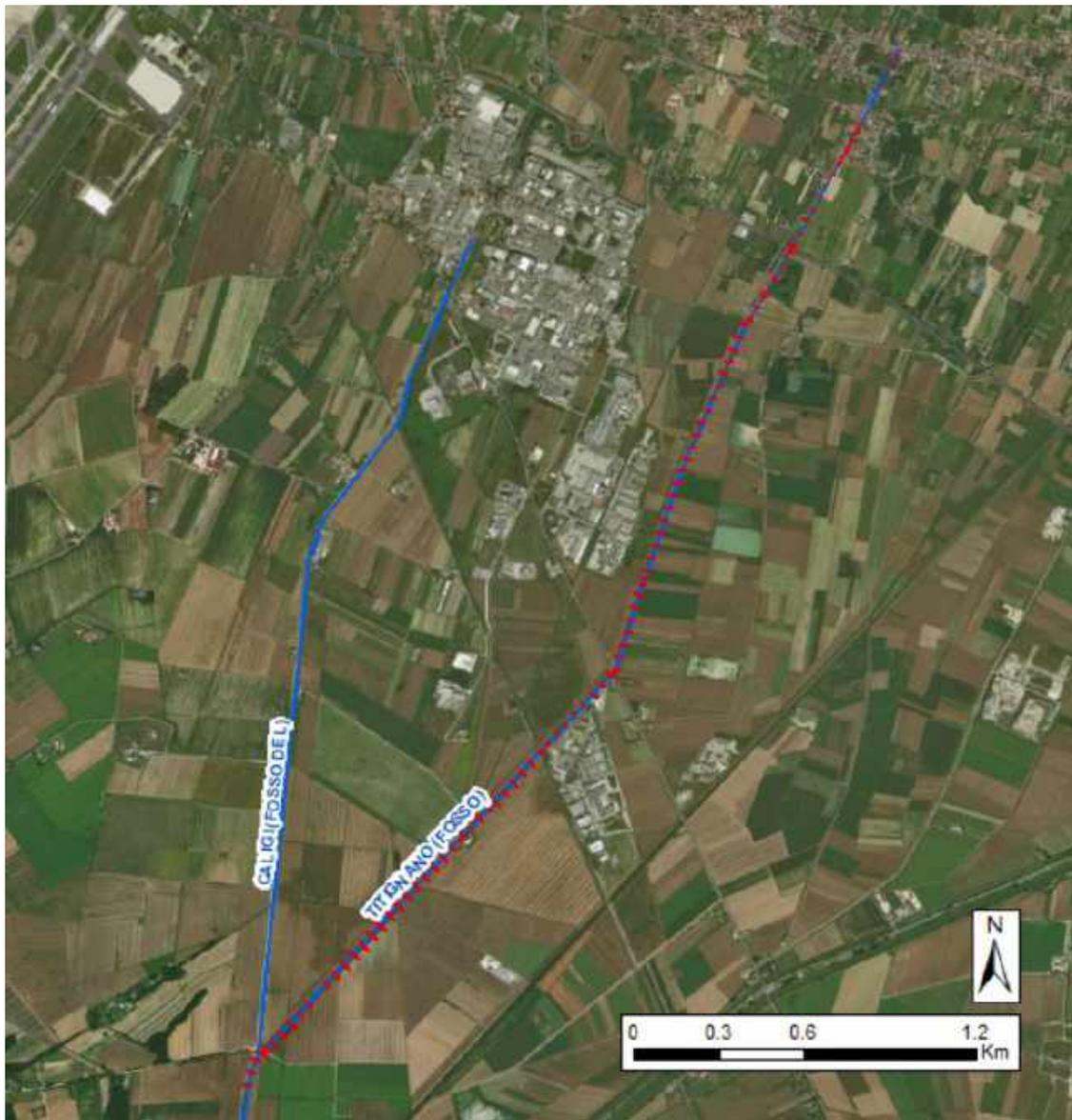


Figura 5.1 Traccia delle sezioni rilevate durante la specifica campagna effettuata per il presente studio sui fossi Caligi e Titignano.

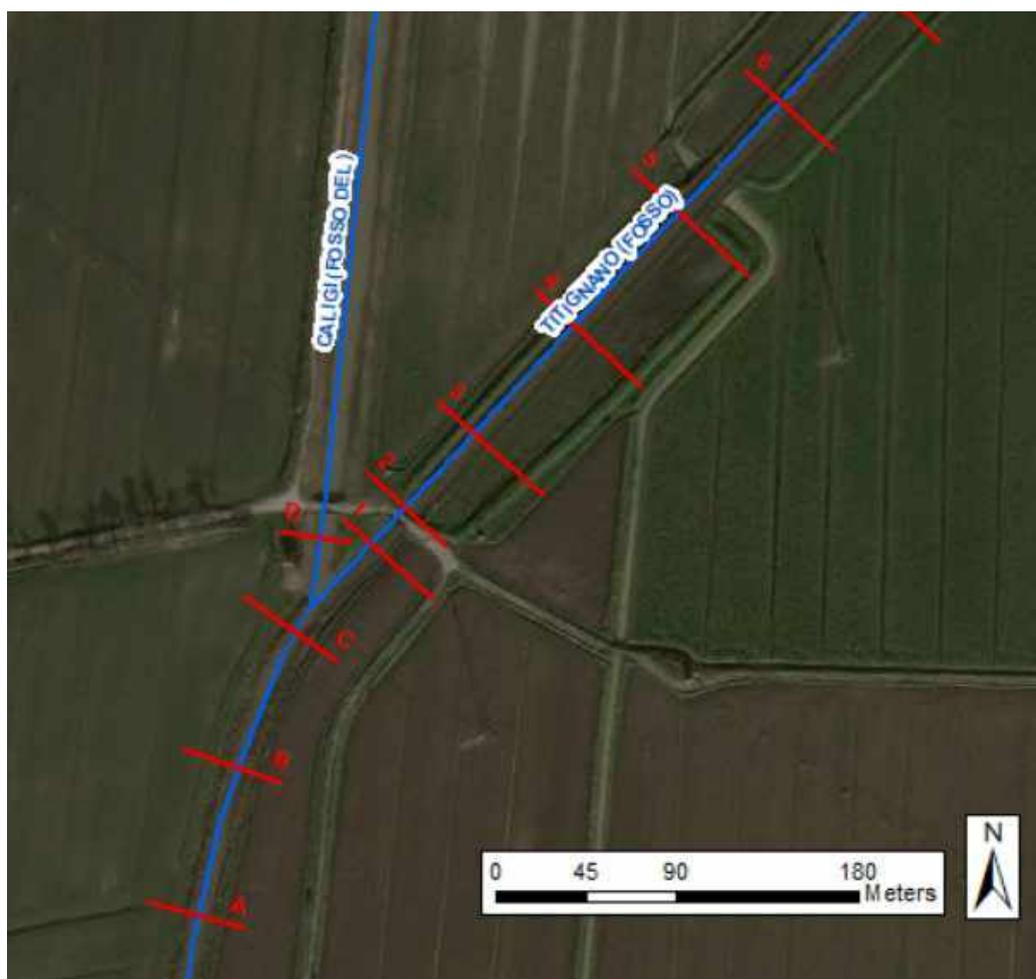


Figura 5.2 Dettaglio della planimetria delle sezioni rilevate in prossimità della confluenza del fosso Titignano con il fosso del Caligi.

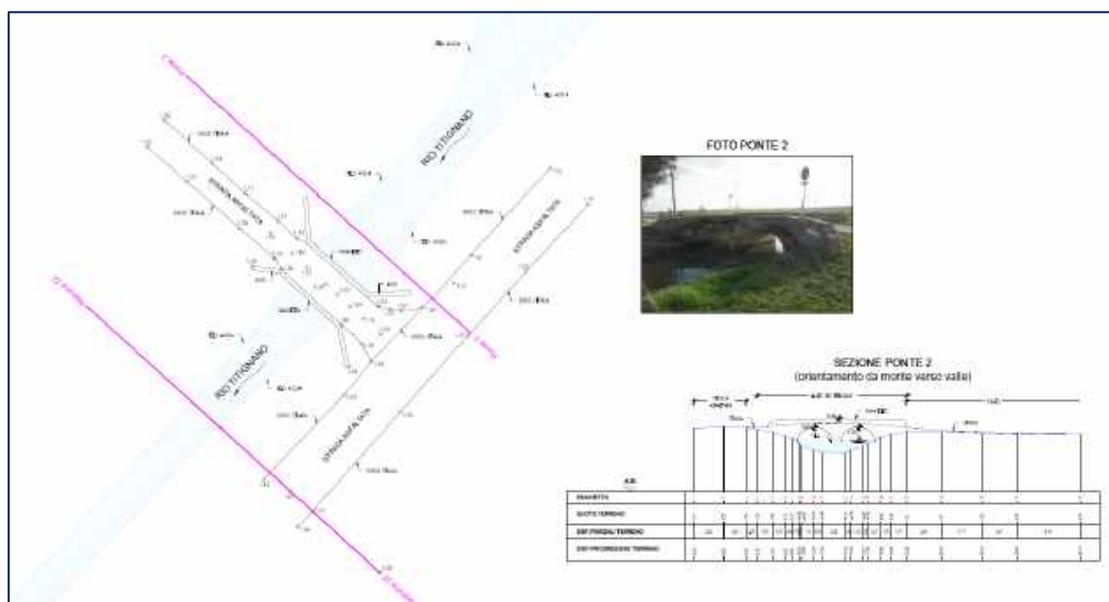


Figura 5.3 Esempio di planimetria e geometria di una sezione oggetto di specifico rilievo, in prossimità di un ponte sul fosso Titignano, così come rappresentato nel formato di restituzione.

6 Analisi idrologica

L'analisi idrologica, nel seguito descritta, è finalizzata alla determinazione degli idrogrammi di piena da utilizzare nella modellazione idraulica di dettaglio dei corsi d'acqua oggetto di studio.

A tal fine, è opportuno precisare come tra le attività previste nel presente studio non sia compreso lo svolgimento di alcuna analisi idrologica di dettaglio, poiché il complesso degli studi pregressi a disposizione fornisce un quadro già sufficientemente ampio e dettagliato in materia. Tuttavia, è possibile che alcuni idrogrammi di piena di alcuni corsi d'acqua, per specifici tempi di ritorno, non risultino disponibili: in tal caso la presente analisi idrologica ha avuto l'obiettivo di determinare tali idrogrammi mancanti a partire da quelli messi a disposizione dagli studi pregressi, senza mettere in discussione la metodologia precedentemente impiegata per la determinazione degli stessi, essendo stati tali studi già validati ed acquisiti dagli Enti competenti.

Come già illustrato in precedenza, la zona analizzata comprende sia un sistema a scolo naturale, o di "acque alte", che uno a scolo meccanico, o di "acque basse". Per tener conto della diversa tipologia di apporto, gli input idrologici ai corsi d'acqua in esame vengono distinti tra:

- contributi immessi attraverso gli impianti idrovori, relativi alle acque basse;
- contributi affluenti mediante deflusso naturale, relativi alle acque alte.

Per una rappresentazione generale dell'insieme delle aree soggette a bonifica, con le rispettive idrovore, e delle restanti aree a scolo naturale, che interessano i canali analizzati, si rimanda alla precedente Figura 3.3.

I contributi dei deflussi meccanici e naturali sono stati determinati a seguito dell'analisi di diversi studi pregressi, come illustrato nel Capitolo 2. Lo studio risultato più completo ed aggiornato, nonché già acquisito dall'Autorità di Bacino dell'Arno, è stato quello commissionato dal Comune di Collesalveti allo Studio Tecnico Associato di Ingegneria PR.I.MA di Livorno, denominato "Studio idrologico - idraulico a supporto del regolamento urbanistico", pubblicato nel 2015.

In particolare, per ciò che concerne il contributo degli impianti idrovori, viene adottata l'ipotesi semplificativa di immissione nel rispettivo corso d'acqua costante nel tempo e pari alla portata a pieno regime dell'impianto, procedendo così in via cautelativa.

I contributi delle idrovore che interessano i canali oggetto di studio sono riportati in Tabella 6.1.

Tabella 6.1 Portate degli impianti idrovori afferenti ai corsi d'acqua oggetto di studio.

Idrovora	Q [m³/s]	Recapito
Padulella	0.50	F. Caligi
Arnaccio	6.50	F. Chiara
Biscottino	0.40	F. Chiara
Pisa sud	12.00	C. Navicelli
Aeroporto	9.00	C. Navicelli
Ragnaione	13.60	C. Navicelli
La Vettola	3.75	C. Navicelli
Calambrone	4.20	C. Navicelli

Per la determinazione delle portate a scolo naturale sono state fatte alcune ipotesi metodologiche a partire dai risultati dello studio sopra citato. Il documento riporta, tra le varie cose, il comportamento idrologico del Canale Scolmatore ed i relativi affluenti, tra cui la Fossa Chiara.

Al riguardo è opportuno precisare come la Fossa Chiara, di fatto, includa dal punto di vista idrologico anche gli altri corsi d'acqua oggetto del presente studio, in quanto il Fosso del Caligi, e

prima ancora il Fosso Titignano, risultano suoi affluenti. In linea teorica, da questo insieme risulterebbe escluso il Canale dei Navicelli; tuttavia, nello studio sopraccitato, parte dei contributi ad esso afferenti sono in realtà stati associati in via semplificata alla Fossa Chiara, poiché i due corsi d'acqua si vanno ad unire proprio in prossimità dello sbocco nel Canale Scolmatore, per il quale di fatto costituiscono un unico ingresso puntuale di portata; tale approssimazione svolta dagli Autori dello studio predetto, pertanto, non comporta alcuna differenza sostanziale sull'analisi idrologica del corso d'acqua principale.

Il Fossa Chiara è un canale di bonifica nel quale scaricano sia collettori di bonifica di acque basse, attraverso gli impianti idrovori della Padulella e dell'Amaccio, sia canali di acque alte, come il Fosso del Caligi. Ha una lunghezza di circa 8 km dall'origine, situata nel Comune di Calcinaia, allo sbocco nel canale dei Navicelli, poche centinaia di metri prima della confluenza nello Scolmatore. Il suo bacino è esteso circa 65 km² (di cui 24 km² a scolo meccanico e 41 km² a scolo naturale) e include sia aree a destinazione agricola sia vaste aree industriali.

Lo studio sopraccitato, commissionato dal Comune di Collesalveti, riporta gli idrogrammi di piena alla chiusura del Fossa Chiara derivanti da eventi di durata 24 e 36 ore, con tempi di ritorno di 30 e 200 anni. Si riportano questi dati in Figura 6.1.

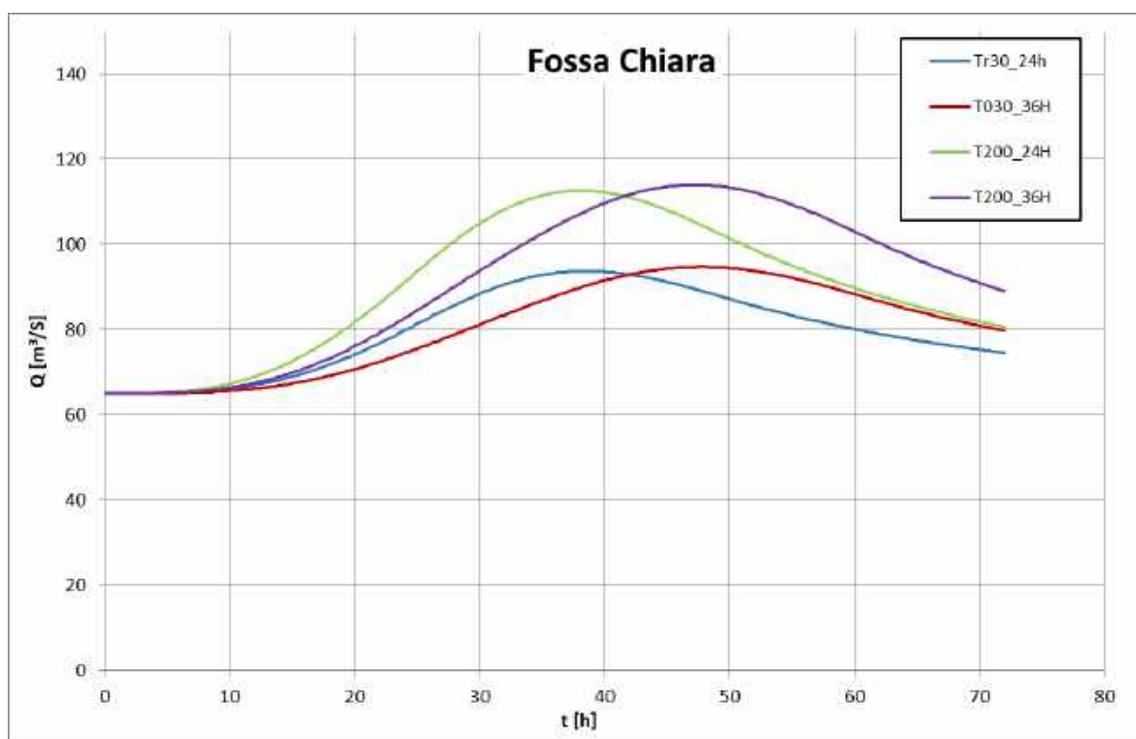


Figura 6.1 Idrogrammi di piena del canale Fossa Chiara, comprensivi del contributo delle idrovore che recapitano nel Canale del Navicelli. Dati reperiti dallo studio commissionato dal Comune di Collesalveti dal titolo: "Studio idrologico - idraulico a supporto del regolamento urbanistico - studio integrativo del canale scolmatore", pubblicato nel 2015.

Gli idrogrammi riportati in Figura 6.1 sono costituiti da una parte costante ed una variabile. La parte costante deriva dai contributi del sistema meccanico, per il quale l'apporto delle idrovore è considerato costante nel tempo e pari al rispettivo valore massimo. Si noti che negli idrogrammi vengono considerati anche i contributi delle idrovore che recapitano nel Canale del Navicelli. La parte variabile degli idrogrammi deriva esclusivamente dai bacini a scolo naturale, ricadenti, in questo studio, principalmente sotto il tratto di competenza del canale Fossa Chiara.

In analogia con gli studi pregressi di analisi idraulica del Canale Scolmatore, oltreché in ottica cautelativa, l'analisi è stata condotta prendendo a riferimento gli idrogrammi derivanti da eventi meteorici della durata di 36 ore. Dalla differenza tra idrogrammi totali ed il contributo assunto

costante delle idrovore, sono stati determinati gli idrogrammi derivanti esclusivamente dal sistema a scolo naturale, con tempo di ritorno 30 e 200 anni.

In dettaglio, tali idrogrammi di portata così determinati presentano valori massimi pari rispettivamente a circa 30 e 50 m³/s per gli eventi trentennale e duecentennale, avendo sottratto un contributo costante delle idrovore pari a circa 65 m³/s agli idrogrammi totali della Fossa Chiara, che presentavano rispettivamente valori massimi di 95 e 115 m³/s.

Le portate così ottenute sono state elaborate in modo tale da ridistribuire i contributi di portata delle diverse aree contribuenti nei corsi d'acqua oggetto del presente studio. A tal fine è stata adottata la seguente metodologia.

- Le aree a scolo naturale sono state suddivise in macro-aree, ognuna delle quali rappresentative di un punto di immissione al reticolo idraulico. Si riportano in Figura 6.2 la perimetrazione delle aree scolanti naturali, con la relativa denominazione adottata e il punto di immissione nei corsi d'acqua.
- La portata di picco è stata ripartita tra i diversi punti di immissione del reticolo di bonifica in modo proporzionale alla rispettiva area contribuyente. Tuttavia, questa semplificazione risulta più che giustificata dal fatto che le diverse aree interessate risultano tra loro adiacenti ed omogenee per orografia ed uso suolo, per cui è legittimo ipotizzare che un evento meteorologico intenso comporti un contributo di portata direttamente proporzionale alla rispettiva area sottesa dal punto di immissione. I valori di portata al picco così determinati sono riassunti in Tabella 6.2.
- Determinate le portate di picco, ciascuno degli idrogrammi è stato ricostruito, in via semplificata e cautelativa, assumendo la stessa forma di quello della Fossa Chiara, che risulta pertanto coincidente con la somma di tutti i contributi dei rispettivi bacini elementari. Si riportano in Figura 6.3 e Figura 6.4 gli idrogrammi risultanti.

Gli idrogrammi così determinati sono stati utilizzati come input al modello idraulico.

Tabella 6.2 Tabella riassuntiva delle principali grandezze idrologiche dei bacini a scolo naturale.

Nome	Recapito	Progr.	Area drenata	Q picco TR30	Q picco TR200
[-]	[-]	[m]	[km ²]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
TITIGNANO_Input1	F. Titignano	0	0.90	0.50	0.83
TITIGNANO_Input2	F. Titignano	1700	6.81	3.81	6.27
TITIGNANO_Input3	F. Titignano	5000	0.97	0.54	0.90
CALIGI_input1	F. Caligi	0	3.80	2.12	3.50
CALIGI_input2	F. Caligi	5900	8.60	4.81	7.92
F_CHIARA_Input1	F. Chiara	0	15.68	8.76	14.45
F_CHIARA_Input2	F. Chiara	5100	4.09	2.29	3.77
NAVICELLI_Input1	C. Navicelli	0	1.03	0.58	0.95
COLTANO_Input1	C. Navicelli	6500	3.61	2.02	3.33
NAVICELLI_Input2	C. Navicelli	9500	7.63	4.26	7.03

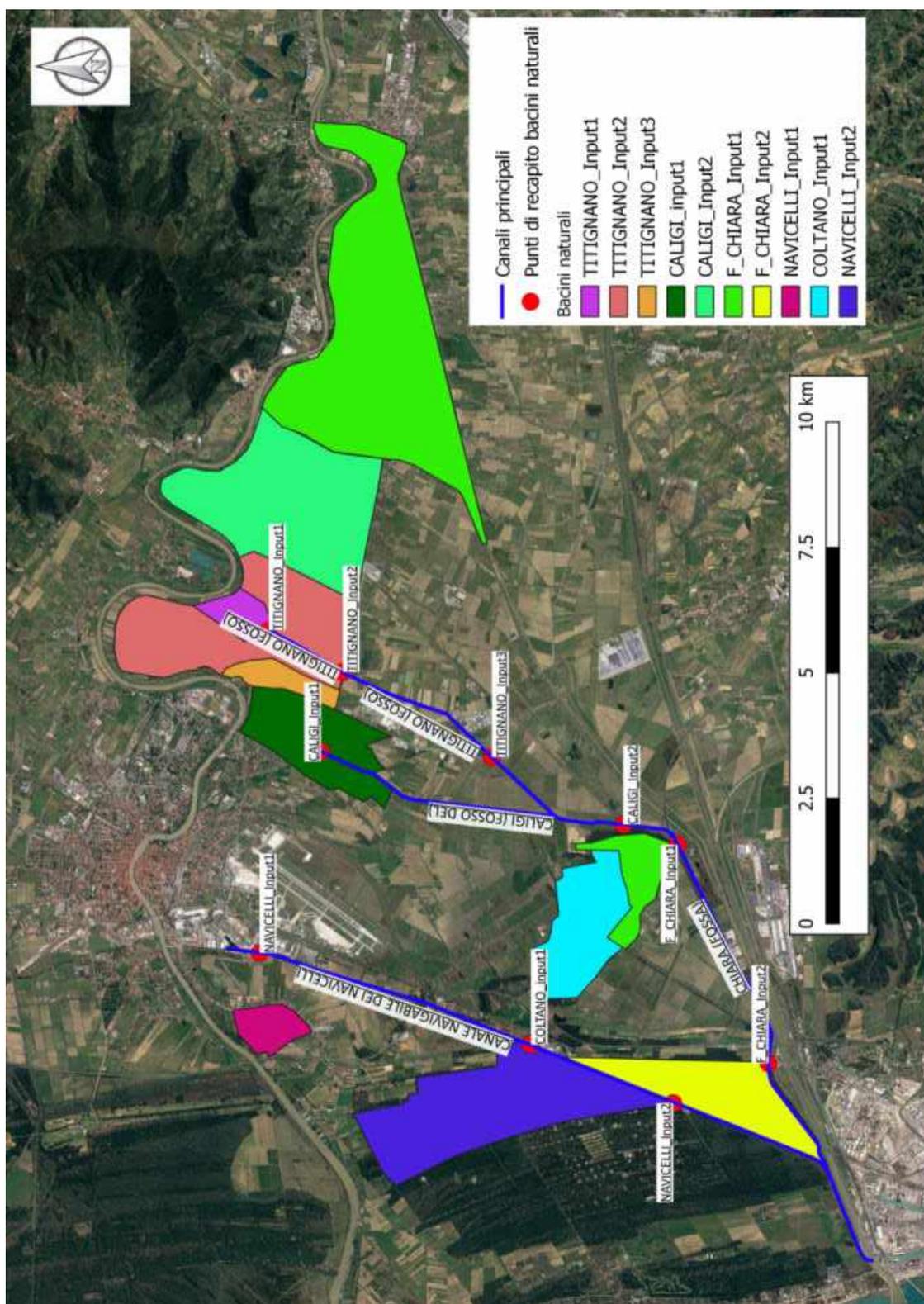


Figura 6.2 Identificazione delle aree drenanti a scolo naturale (palette multicolore) e punti di immissione nel reticolo idrografico modellato (in rosso).

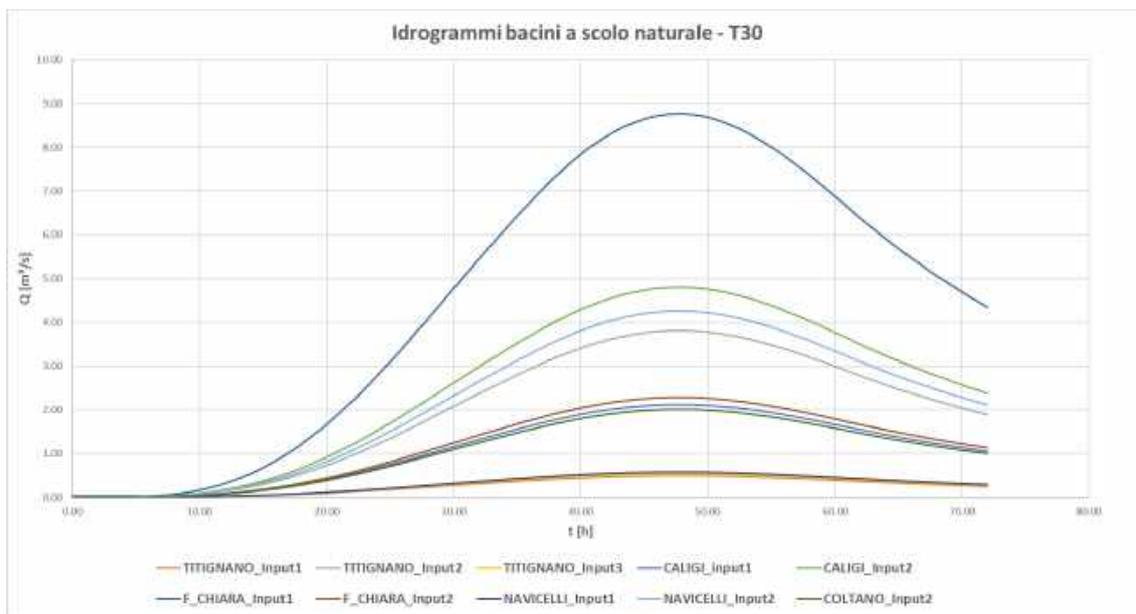


Figura 6.3 Idrogrammi delle aree contribuenti a scolo naturale con tempo di ritorno 30 anni.

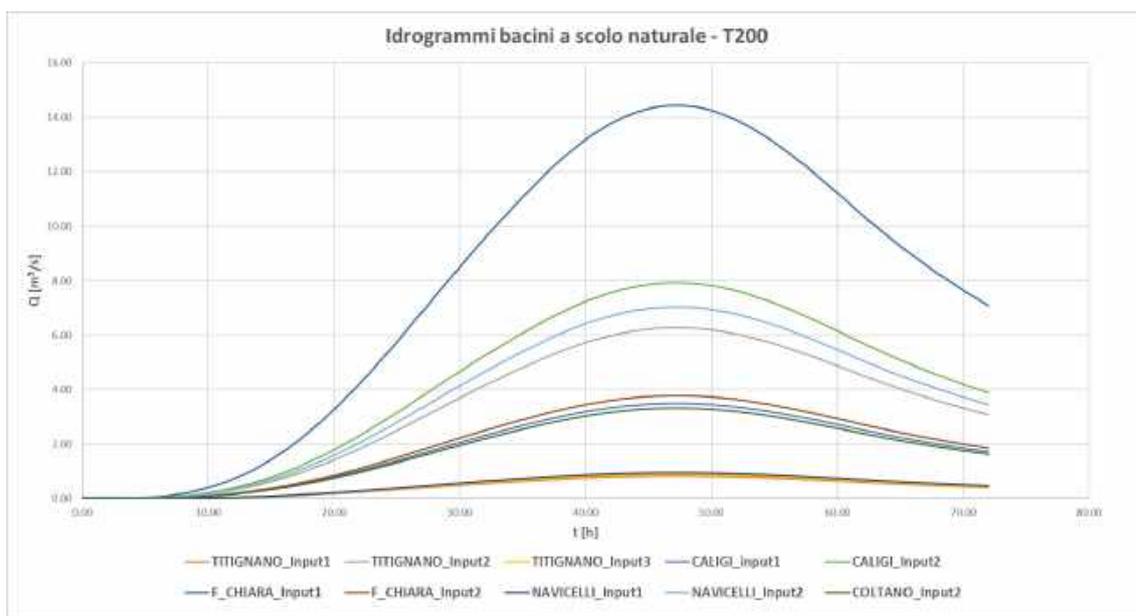


Figura 6.4 Idrogrammi delle aree contribuenti a scolo naturale con tempo di ritorno 200 anni.

7 Analisi idraulica

Nel presente capitolo vengono descritte le attività relative alle simulazioni idrodinamiche della propagazione delle acque di piena negli alvei dei corsi d'acqua oggetto di studio e la loro successiva esondazione nel territorio circostante.

Per lo svolgimento delle analisi idrauliche sono stati utilizzati sia i dati derivanti da studi pregressi, citati nel Capitolo 2, che le informazioni ed analisi raccolte e svolte specificatamente per lo studio in questione, discussi nei capitoli precedenti.

A valle del completamento del quadro conoscitivo, sono state condotte tutte le attività necessarie all'implementazione del modello idraulico basato su uno schema integrato monodimensionale e bidimensionale. In particolare, è stato preliminarmente definito il dominio di studio da rendere oggetto di modellazione (Par.7.2.1) e la schematizzazione con cui rappresentarlo, tra modello monodimensionale e bidimensionale (Par. 7.2.2). In seguito, sono stati schematizzati i corsi d'acqua oggetto di indagine con il modello MIKE HYDRO River, in termini di definizione delle sezioni trasversali, degli attraversamenti, della scabrezza idraulica, delle condizioni al contorno e degli altri parametri idrodinamici della modellazione monodimensionale (Cap. 7.3). Analogamente, per la parte di dominio schematizzata nel modello bidimensionale, è stata definita la griglia di calcolo e altri parametri idrodinamici quali le condizioni al contorno e il passo di calcolo di simulazione (Par. 7.4). Infine, sono state definite in MIKE FLOOD le strutture di collegamento tra i due modelli 1D e 2D. (Par. 7.5).

Al termine del Capitolo, nel Par. 7.6 vengono illustrati i risultati ottenuti per eventi di piena con tempo di ritorno di 30 e 200 anni.

7.1 Approccio modellistico generale

Sull'area del dominio di studio è stato implementato un modello idrodinamico basato sul codice di calcolo MIKE FLOOD di DHI.

Il codice di calcolo MIKE FLOOD è uno strumento modellistico integrato che permette di accoppiare in maniera dinamica, attraverso un'interfaccia utente grafica, il codice monodimensionale MIKE HYDRO River e quello bidimensionale MIKE 21 (per una descrizione sintetica dei quali si rimanda agli Allegati C e D).

Il modello consente di sfruttare al massimo le potenzialità di MIKE HYDRO River e di MIKE 21, facendo intervenire nell'ambito di uno stesso strumento l'uno o l'altro codice in funzione delle specifiche esigenze di rappresentazione geometrica e di simulazione necessarie: MIKE HYDRO River per la simulazione monodimensionale di tratti di alveo incisi e per il deflusso idrodinamico attraverso strutture quali ponti, tombini e salti di fondo, MIKE 21 per il deflusso nelle aree golenali o di esondazione e di invaso.

Tra le caratteristiche principali di MIKE FLOOD vi è:

- MIKE HYDRO River e MIKE 21 rimangono singoli codici indipendenti l'un l'altro nella messa a punto, nell'interfaccia grafica e nell'input-output;
- una specifica interfaccia grafica consente di definire i collegamenti reciproci e biunivoci di MIKE HYDRO River e MIKE 21 per gli scambi di flusso e la congruenza dei livelli idrici di calcolo.

L'alveo del corso d'acqua viene modellato con approccio monodimensionale attraverso l'inserimento delle sezioni trasversali disponibili, comprensive delle geometrie dei ponti interferenti con il deflusso di piena.

L'alveo viene poi collegato dinamicamente alle aree laterali inondabili, sia in sponda destra che in sponda sinistra, mediante speciali funzioni di MIKE FLOOD, nel rispetto delle reali quote di sponda. La modellazione accurata della dinamica di piena, effettuata con approccio bidimensionale, viene estesa all'intera zona in esame, sia in sponda destra che in sponda sinistra, rappresentata mediante un modello del terreno a celle quadrate, contenente tutte le strutture in grado di avere effetto nella propagazione della piena stessa sul territorio.

Per quanto concerne le modellazioni in alveo, i risultati delle simulazioni condotte sono forniti sotto forma di tabelle, riportate in Allegato A, contenenti i principali parametri idraulici sezione per sezione. Relativamente alle aree inondate, invece, i risultati ottenuti sono forniti sotto forma di mappe di tiranti idrici e velocità di scorrimento riferite ai loro valori massimi, così come riportate in Allegato B.

7.2 Definizione del dominio di studio

La definizione del dominio di studio e le modalità di schematizzazione dello stesso nel codice di calcolo hanno comportato la valutazione di due differenti aspetti: in primo luogo la definizione dell'estensione dell'area da analizzare, in secondo luogo le modalità di modellazione del dominio di studio con il codice MIKE FLOOD, con il quale è possibile scegliere di rappresentare parte del dominio con codice monodimensionale e parte con quello bidimensionale.

7.2.1 Estensione del dominio di studio

Nell'ottica di integrare il sistema idraulico delle Bonifiche nella piattaforma modellistica idraulica del Comune di Pisa, si è ritenuto opportuno mantenere lo stesso dominio di studio utilizzato nei precedenti modelli, già in possesso dell'Ente. In particolare, si fa riferimento allo studio idraulico sul Canale Scolmatore redatto dagli scriventi secondo quanto stabilito dall'Amministrazione con Determinazione Dirigenziale n° 1019 del 27/09/2016.

Nello studio sopra citato l'area di studio era stata definita, oltre che tenendo conto dei confini amministrativi del Comune di Pisa, sulla base della perimetrazione delle aree allagabili del fiume Arno e del Canale Scolmatore derivanti da studi pregressi e normative vigenti, quali PAI e successivo PRGA pubblicati dall'Autorità di Bacino dell'Arno.

L'area di studio risulta quindi delimitata a ovest dal Mar Tirreno, a nord dal fiume Arno, a sud dal Canale Scolmatore e ad est dalla derivazione dello Scolmatore dall'Arno. Complessivamente il dominio così descritto ha una dimensione di circa 18x28 km.

Più in dettaglio, poiché il presente studio è finalizzato all'analisi idraulica del reticolo secondario posto nella parte sud del territorio pisano, tra gli alvei del fiume Arno e del suo Scolmatore, ai fini dell'ottimizzazione computazionale del modello idraulico e delle relative simulazioni, il dominio di studio è stato circoscritto alla porzione di territorio sopraccitata, non essendo in alcun modo coinvolta la parte di dominio a nord dell'Arno.

Si riporta in Figura 7.1 l'estensione completa del dominio di studio con evidenziato il reticolo secondario oggetto di modellazione.

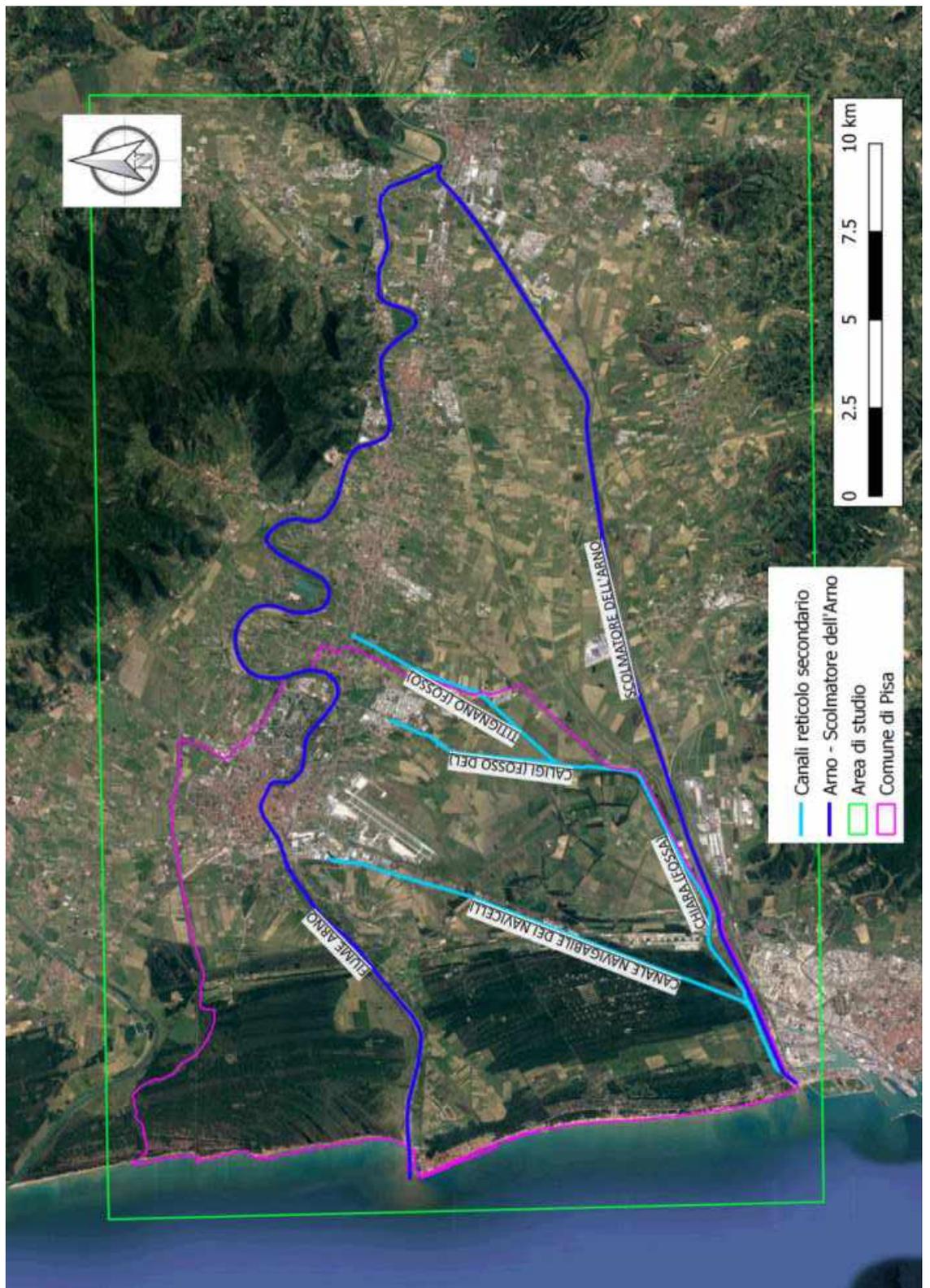


Figura 7.1 Estensione del dominio di studio bidimensionale (in verde), limiti amministrativi del Comune di Pisa (in viola), fiume Arno e Canale Scolmatore (in blu) e canali del reticolo secondario oggetto di studio (in azzurro).

7.2.2 Schematizzazione del domino di studio in MIKE FLOOD

L'area ricadente nel dominio di studio viene rappresentata nel modello numerico MIKE FLOOD distinguendo tra i canali principali del reticolo idrografico secondario, rappresentati con modello monodimensionale MIKE HYDRO River, e l'area di esondazione dei canali stessi, descritti con approccio bidimensionale attraverso MIKE 21.

Come già illustrato nel Paragrafo 3.1, il reticolo idrografico secondario oggetto d'analisi risulta composto da Fosso Titignano, Fosso del Caligi, Canale Navigabile dei Navicelli e Fossa Chiara, tra loro interconnessi come illustrato in Figura 7.1. In termini generali tali corsi d'acqua vengono schematizzati nella modellazione monodimensionale attraverso una serie di sezioni trasversali d'alveo, a cui si aggiunge la rappresentazione di tutte le opere antropiche, quali ponti ed altri attraversamenti, al fine di una corretta riproduzione del deflusso degli eventi di piena.

Per tener conto dell'interazione tra i canali del reticolo secondario ed il canale Scolmatore, è stato necessario inserire anche il tratto terminale di quest'ultimo all'interno della modellazione monodimensionale. Tali canali, infatti, al termine del loro percorso, confluiscono nello Scolmatore, il quale impone una condizione al contorno di valle particolarmente gravosa.

L'inserimento dell'ultimo tratto di Canale Scolmatore all'interno del modello, è stato quindi finalizzato a una più accurata rappresentazione delle condizioni di deflusso che in esso si realizzano e, conseguentemente, del livello che impone alla confluenza dei canali oggetto di studio, per effetto sia del livello di valle imposto dal mare sia dell'idrogramma di piena di cui è oggetto a monte della confluenza.

Per la rappresentazione del Canale Scolmatore all'interno del modello, si è fatto riferimento a quanto già disponibile dagli studi pregressi. Poiché esso non risulta parte dei corsi d'acqua oggetto di studio, e il suo inserimento nel modello idraulico è finalizzato esclusivamente alla corretta rappresentazione della condizione al contorno di valle presso la confluenza, le relative informazioni, in termini di schematizzazione dell'alveo e conseguenti risultati, non sono state riportate nel presente elaborato, poiché non pertinenti.

L'area limitrofa ai canali modellati con MIKE HYDRO River è stata rappresentata attraverso il modello bidimensionale MIKE 21. Il modello permette di rappresentare la propagazione delle onde di piena provenienti dalla modellazione monodimensionale nel territorio circostante, in questo caso circoscritto tra gli alvei del fiume Arno e del suo Scolmatore.

Si riporta in Figura 7.2 il dominio di studio schematizzato nella modellazione monodimensionale (MIKE HYDRO River) e bidimensionale (MIKE 21).

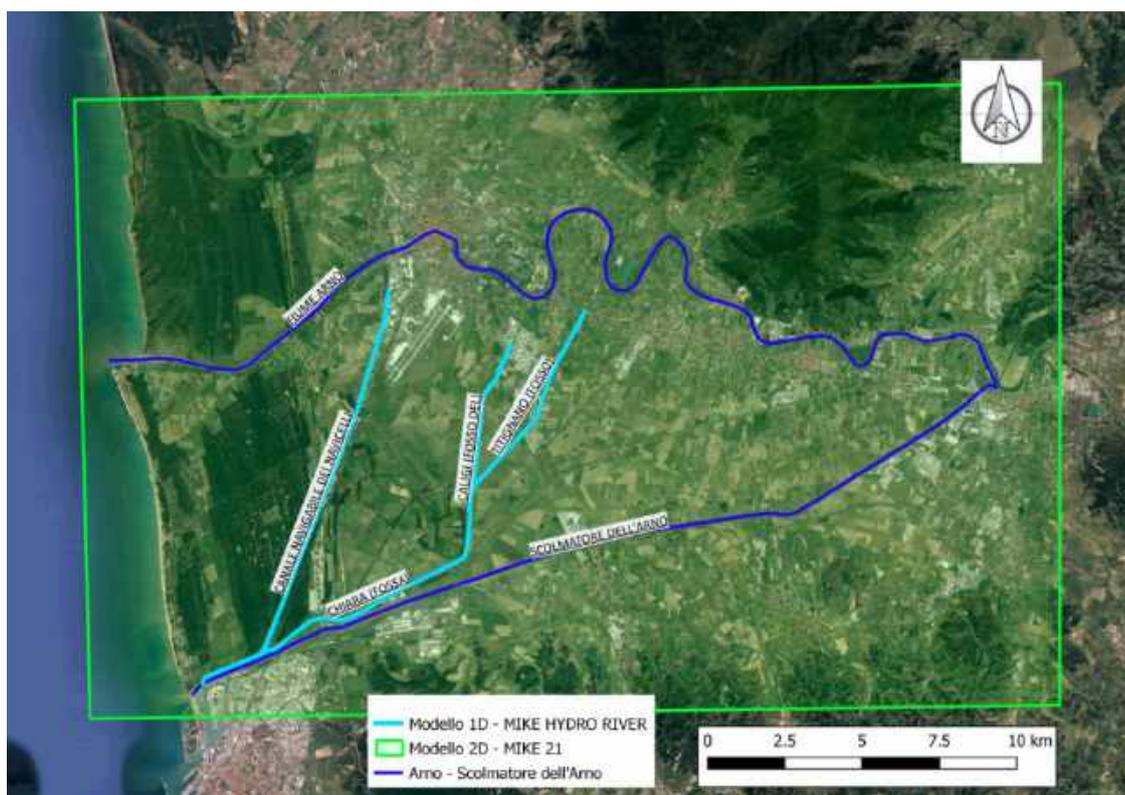


Figura 7.2 Schematizzazione del dominio di studio nei modelli MIKE HYDRO River e MIKE 21.

7.3 Schematizzazione dell'alveo dei canali oggetto di studio

Di seguito si illustra in dettaglio la schematizzazione monodimensionale dell'alveo dei canali oggetto di studio, la cui modellazione è stata effettuata con il codice di calcolo MIKE HYDRO River di DHI, descritto nell'Allegato C.

7.3.1 Geometria delle sezioni trasversali

Il modello idrodinamico monodimensionale schematizza l'intero sviluppo longitudinale dei canali oggetto d'analisi, secondo le informazioni geometriche di sezioni trasversali ed attraversamenti reperite dalle diverse fonti, per ciascuno dei corsi d'acqua, così come illustrato nei precedenti capitoli.

Nonostante la pluralità di origine dei dati, essi sono risultati coerenti tra di loro, anche nelle zone di confluenza, permettendo così una buona rappresentazione del profilo altimetrico. Inoltre, è stata verificata la relativa congruenza anche con i valori altimetrici del DTM LiDAR fornito dal Committente, garantendo così un'ottima corrispondenza tra la modellazione monodimensionale dei corsi d'acqua e quella bidimensionale del territorio circostante.

Il Canale Scolmatore, come illustrato in precedenza, è stato rappresentato solo nel suo tratto terminale, in particolare a partire dall'attraversamento ferroviario localizzato circa 3 km a monte dello sbocco in mare, ricavando le relative informazioni dagli studi pregressi.

In Tabella 7.1, Tabella 7.2, Tabella 7.3 e Tabella 7.4 sono elencate tutte le sezioni inserite nel modello rispettivamente per il Fosso Titignano, il Fosso del Caligi, la Fossa Chiara e il Canale Navigabile dei Navicelli.

I corsi d'acqua studiati presentano inoltre diverse strutture antropiche trasversali che vanno ad influenzare il comportamento idraulico dell'onda di piena, la maggior parte delle quali è dovuta ad attraversamenti di strade di rilevanza locale. Complessivamente nel modello idraulico sono stati inseriti 33 attraversamenti, schematizzati in MIKE HYDRO River in modo da poter rappresentare sia il deflusso al di sotto delle strutture, con moto a pelo libero o in pressione, sia quello eventualmente di sormonto delle stesse.

Tabella 7.1 Tabella delle sezioni trasversali del Fosso Titignano schematizzate nel modello MIKE HYDRO River, con indicazione della nomenclatura della sezione e relativa progressiva idraulica.

Fosso Titignano - Sezioni							
Progr.	N.	Progr.	N.	Progr.	N.	Progr.	N.
(m)	Sez.	(m)	Sez.	(m)	Sez.	(m)	Sez.
0.00	P23	649.12	S83	1977.68	S64	4462.00	P4v
28.00	P22m	671.00	P13m	2128.00	P7m	4476.00	P3m
32.00	P22v	681.00	P13v	2132.00	P7v	4481.00	P3v
69.00	P21m	841.26	S80	2279.15	S61	4553.12	S30
74.00	P21v	1066.27	S77	2504.16	S58	4853.14	S26
107.00	P20m	1229.50	P12m	2720.64	S55	5053.16	S23
112.00	P20v	1249.50	P12v	2945.15	S52	5119.00	P2m
202.00	P19	1299.00	P11m	3249.00	P6m	5124.00	P2v
442.00	P18	1302.00	P11v	3253.00	P6v	5352.75	S19
474.00	P17m	1351.41	S73	3390.74	S46	5650.68	S15
484.00	P17v	1420.00	P10m	3615.75	S43	5953.23	S11
498.00	P16m	1426.00	P10v	3850.04	S39	6253.24	S7
504.00	P16v	1530.00	P9m	3856.00	P5m	6553.25	S4
542.00	P15m	1534.00	P9v	3866.00	P5v	6703.26	S2
545.00	P15v	1633.63	S69	3883.02	S38	6753.00	P1m
568.23	S85	1712.00	P8m	4103.08	S35	6757.00	P1v
612.00	P14m	1718.00	P8v	4403.10	S31	6820.00	S1
622.00	P14v	1753.02	S67	4456.00	P4m		

Tabella 7.2 Tabella delle sezioni trasversali del Fosso del Caligi schematizzate nel modello MIKE HYDRO River, con indicazione della nomenclatura della sezione e relativa progressiva idraulica.

Fosso Caligi - Sezioni							
Progr.	N.	Progr.	N.	Progr.	N.	Progr.	N.
(m)	Sez.	(m)	Sez.	(m)	Sez.	(m)	Sez.
0.00	2	1485.81	25m	2422.57	38	4514.22	61
719.91	13	1505.81	25v	2860.62	43	4568.21	62
725.81	14m	1568.97	26	3369.11	48	5067.86	67
745.81	14v	2069.34	32	3865.23	53	5405.99	73
768.92	15	2084.47	33m	3979.49	54	5857.55	78
1168.57	19	2104.47	33v	4369.24	58	6467.92	84
1252.60	20m	2169.10	34	4448.76	59m	6820.00	89
1272.60	20v	2369.64	36	4462.00	59v	6878.00	89bis
1274.41	21	2398.69	37m	4468.97	60		
1476.99	24	2418.69	37v				

Tabella 7.3 Tabella delle sezioni trasversali del Fossa Chiara schematizzate nel modello MIKE HYDRO River, con indicazione della nomenclatura della sezione e relativa progressiva idraulica.

Fossa Chiara - Sezioni							
Progr.	N.	Progr.	N.	Progr.	N.	Progr.	N.
(m)	Sez.	(m)	Sez.	(m)	Sez.	(m)	Sez.
0.00	52bis	1883.14	74m	4513.40	105m	6643.94	124
31.02	52	1903.14	74v	4533.40	105v	6971.27	127
309.10	55	1989.60	75	4588.37	106	7002.36	128m
315.00	56m	2389.42	79	4942.71	109	7022.36	128v
323.00	56v	2845.10	84	5022.94	110m	7061.47	129
388.06	57	2923.01	86	5042.94	110v	7424.66	133
688.47	61	3388.24	91	5104.06	111	7429.84	134m
1188.54	66	3738.68	95	5471.00	115	7439.85	134v
1587.83	70	4088.60	99	6066.66	120	7449.85	Confl
1873.25	73	4491.27	104				

Tabella 7.4 Tabella delle sezioni trasversali del Canale Navigabile dei Navicelli schematizzate nel modello MIKE HYDRO River, con indicazione della nomenclatura della sezione e relativa progressiva idraulica.

Canale Navigabile dei Navicelli - Sezioni							
Progr.	N.	Progr.	N.	Progr.	N.	Progr.	N.
(m)	Sez.	(m)	Sez.	(m)	Sez.	(m)	Sez.
0.00	sez1	4000.00	sez10	7500.00	sez19	11500.00	sez27
500.00	sez2	4251.00	sez11	8000.00	sez20	12000.00	sez28
850.00	sez3	4500.00	sez12	8500.00	sez21	12500.00	sez29
1500.00	sez4	5000.00	sez13	9000.00	sez22	12633.00	sez30
2000.00	sez5	5500.00	sez14	9500.00	sez23	13000.00	sez31
2236.00	sez6	6000.00	sez15	10000.00	sez24	13500.00	sez32
2500.00	sez7	6223.00	sez16	10500.00	sez25	14000.00	sez33
3000.00	sez8	6500.00	sez17	11000.00	sez26	14500.00	sez34
3500.00	sez9	7000.00	sez18				

7.3.2 Scabrezza idraulica

La scabrezza idraulica rappresenta, all'interno delle equazioni del moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo per effetto dell'attrito di scorrimento sul fondo e sulle sponde dell'alveo attivo. Tale parametro è difficilmente valutabile con precisione ed è normalmente oggetto di taratura in fase di calibrazione del modello idraulico.

Nel caso in esame, non sono risultati disponibili misure dei livelli idrici negli alvei dei corsi d'acqua in corrispondenza di eventi di piena, con i quali condurre un'attività di calibrazione del modello idraulico. Inoltre, è opportuno evidenziare come tutti i canali oggetto di studio risultino di natura antropica e oggetto di regolare manutenzione da parte dei rispettivi Enti deputati alla gestione. Pertanto, in accordo con i valori disponibili da letteratura e con gli studi pregressi, previa verifica di un'omogeneità dal punto di vista idraulico che ne permettesse la definizione di un unico valore, è stato adottato un coefficiente medio di scabrezza di Strickler pari a $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per tutti i corsi d'acqua modellati.

7.3.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno costituiscono la forzante principale al modello idraulico. Come già illustrato nel Capitolo 6, la portata in ingresso al reticolo idraulico secondario deriva in parte dal contributo delle idrovore e in parte dai bacini a scolo naturale.

Gli eventi di piena oggetto di simulazione sono quelli aventi tempo di ritorno 30 e 200 anni. I rispettivi idrogrammi di piena, per tutte le aree contribuenti dei canali, rappresentano pertanto le condizioni al contorno di monte del modello idraulico, secondo il dettaglio illustrato nel seguito del presente Paragrafo.

La condizione al contorno di valle, invece, sarebbe rappresentata dal livello nella sezione terminale del dominio di studio, corrispondente alla confluenza del canale dei Navicelli nel canale Scolmatore. Tuttavia, in accordo con quanto precedentemente illustrato nel Par. 7.2.2, anche il tratto terminale del canale Scolmatore è stato incluso nella modellazione monodimensionale, al fine di rappresentare al meglio le condizioni di deflusso in corrispondenza della confluenza. Secondo questo approccio, pertanto, l'idrogramma di piena in ingresso al tratto terminale dello Scolmatore risulta appartenere al complesso delle condizioni al contorno di monte, mentre la condizione di valle della modellazione monodimensionale così estesa risulta essere il livello marino presso la foce dello Scolmatore.

In merito agli idrogrammi di piena del canale Scolmatore, da applicare quale condizione al contorno dei modelli idraulici per la simulazione degli eventi di piena del reticolo secondario con tempo di ritorno 30 e 200 anni, è necessario definire a quali tempi di ritorno fare riferimento. Al riguardo si è osservato come nel territorio oggetto di indagine, data l'orografia particolarmente pianeggiante e la pendenza pressoché nulla del reticolo secondario, la condizione al contorno prevalente, che provoca l'esondazione dei canali, sia principalmente il rigurgito degli stessi per effetto dell'innalzamento del livello presso la confluenza con lo Scolmatore, piuttosto che l'entità della totalità delle portate recapitate dai relativi bacini idrografici, a scolo meccanico e naturale.

Al contempo, dal punto di vista idrologico, ad eventi di pioggia che causano una portata con tempo di ritorno di 30 e 200 anni nell'area delle Bonifiche, non necessariamente corrispondono eventi meteorici che producono idrogrammi di piena con gli stessi tempi di ritorno nel Canale Scolmatore, il cui bacino afferente include anche quello dell'Arno essendo idraulicamente collegato ad esso. Di fatto, questa concomitanza di eventi non presenta un'elevata probabilità, date le diverse dimensioni, ubicazione e caratteristiche idrologiche delle due aree. Tuttavia, in ottica cautelativa, si è scelto di assegnare ad entrambi gli idrogrammi di piena, quelli del reticolo secondario e quello dello Scolmatore, gli stessi tempi di ritorno. Si avrà dunque una simulazione in cui tutti gli idrogrammi di piena avranno tempo di ritorno 30 anni ed un'altra con 200 anni.

Ad ulteriore conferma e validazione della scelta metodologica effettuata, è stata eseguita una simulazione di test, considerando quali condizioni al contorno di monte portate duecentennali per i canali del reticolo secondario, contestualmente con l'idrogramma di piena solamente trentennale dello Scolmatore. I risultati del test hanno evidenziato come l'influenza principale sull'entità delle esondazioni sia da attribuire più al rigurgito indotto dalla piena del canale Scolmatore, piuttosto che alle portate in input nei canali secondari, essendo i risultati sostanzialmente equivalenti a quelli ottenuti imponendo portate trentennali per tutti i corsi d'acqua. In quest'ottica, pertanto, l'attribuzione di un tempo di ritorno inferiore all'idrogramma di piena del canale Scolmatore comporterebbe una potenziale sottostima dell'entità delle esondazioni.

7.3.3.1 Condizione di monte

Le condizioni al contorno di monte dei canali del reticolo secondario corrispondono agli input idrologici già definiti nel Capitolo 6. Si ricorda come gli apporti in ingresso si dividono tra:

- Contributi di portata derivanti dalle idrovore;
- Contributi di portata derivanti dalle aree di scolo dei bacini naturali.

Il tratto di Canale Scolmatore inserito nella modellazione idraulica utilizza come condizione al contorno la portata determinata dalle simulazioni degli studi pregressi. La sezione presso la quale vengono estratte le portate è quella posta in prossimità dell'attraversamento ferroviario (progressiva del modello pregresso pari a 25515.94 m), localizzata circa 3 km a monte dello sbocco a mare. Gli idrogrammi estratti sono riportati in Figura 7.3.

Successivamente, lungo il corso del canale, circa 2 km a valle dell'attraversamento ferroviario sopra citato, è stato inserito anche l'input di portata dovuto all'immissione nel canale Scolmatore dell'Emissario del Bientina, rappresentato in Figura 7.4.

In merito all'entità degli idrogrammi di piena sopraccitati si rimanda agli studi pregressi per una più ampia trattazione, fornendo tuttavia nel seguito un breve inquadramento di sintesi.

Gli idrogrammi del canale Scolmatore presentano tale forma inusuale per una pluralità di fattori. Il primo è relativo alla funzione idraulica di tale corso d'acqua che, come il nome suggerisce, ha il compito di derivare le portate eccedenti ad un prefissato valore soglia dal corso del fiume Arno, in corrispondenza della presa di derivazione, ubicata presso Pontedera. Il secondo fattore, consiste nel fatto che lungo il suo corso, il canale riceve diversi contributi di portata, sia di bacini naturali, in particolare in sponda sinistra, che di aree a scolo meccanico, che vanno pertanto ad incidere sull'entità della portata totale transitante. In ultimo, essendo la sezione di estrazione dei citati idrogrammi nella parte terminale del corso d'acqua, si aggiunge anche un effetto di propagazione dell'onda di piena lungo il corso del canale stesso.

Relativamente all'Emissario del Bientina, invece, si considera un idrogramma avente una portata massima e costante pari a $85 \text{ m}^3/\text{s}$ per tutti gli eventi di piena. Tale circostanza è dovuta al fatto che il deflusso in tale canale risulta condizionato, a monte dell'area del presente studio, dall'attraversamento mediante sifone del fiume Arno, condizione che ne limita la portata defluente al valore massimo sopraccitato.

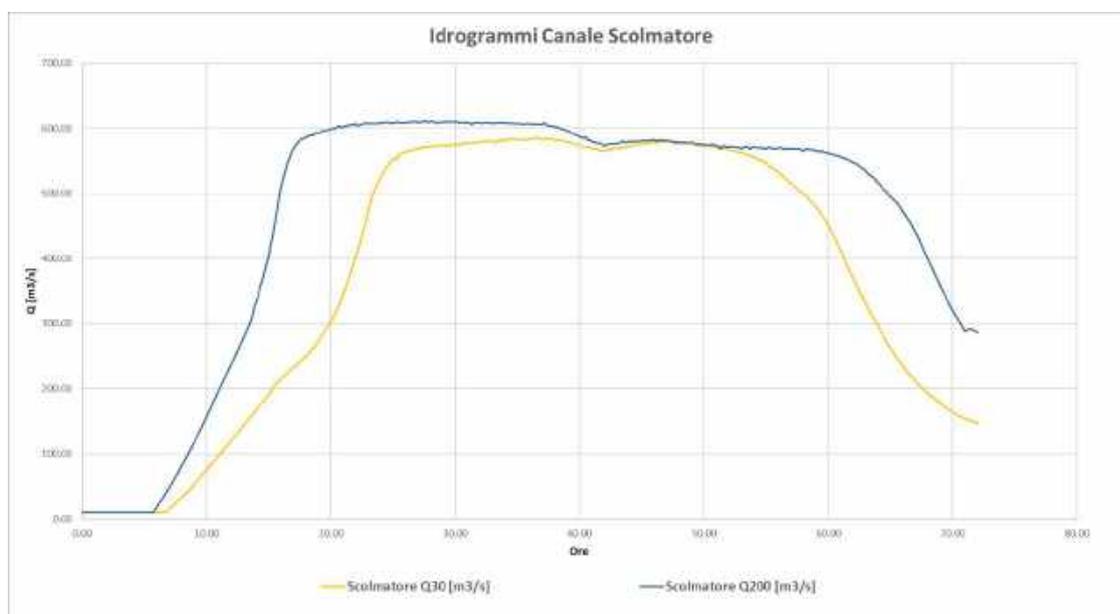


Figura 7.3 Idrogrammi di piena con tempo di ritorno 30 e 200 anni del Canale Scolmatore nella sezione di input al modello, localizzata circa 3 km a monte dello sbocco a mare.

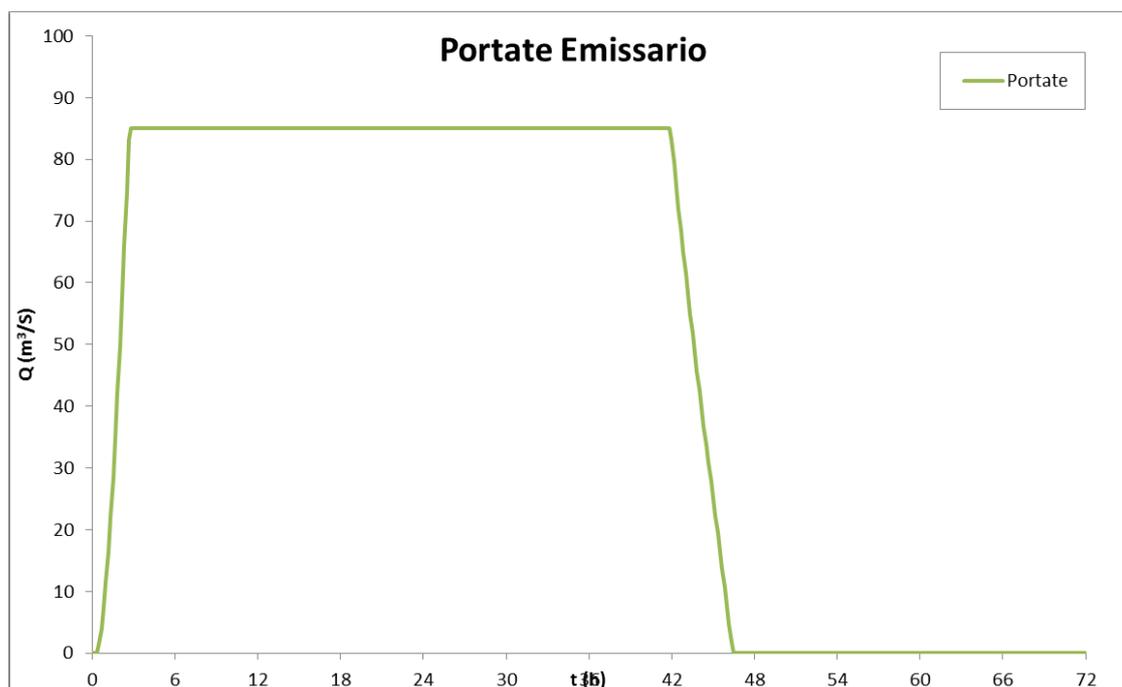


Figura 7.4 Idrogramma di piena con tempo di ritorno 30 e 200 anni del contributo dell’Emissario Bientina.

7.3.3.2 Condizione di valle

La condizione al contorno di valle consente di modellare il deflusso in corrispondenza dell’ultima sezione del modello idrodinamico monodimensionale. Nel caso specifico tale condizione risulta impostata alla sezione terminale del Canale Scolmatore e consiste nell’assegnazione di un livello del pelo libero della corrente in corrispondenza dello sbocco nel Mar Tirreno. Per la definizione dello stesso si è fatto riferimento ai valori forniti dall’Autorità di Bacino che, per tutti i tempi di ritorno, definisce un livello di progetto di valore costante e pari a 0.5 m s.l.m.

7.4 Messa a punto del modello bidimensionale

Per la messa a punto del modello MIKE FLOOD, dopo aver realizzato il modello monodimensionale dei corsi d’acqua del reticolo secondario con il codice MIKE HYDRO River, si è proceduto alla costruzione del modello bidimensionale delle aree allagabili del dominio di studio utilizzando il codice di calcolo MIKE 21 del DHI descritto nell’Allegato D.

Successivamente, utilizzando il codice MIKE FLOOD, si è proceduto all’accoppiamento dei due modelli (monodimensionale e bidimensionale) mediante collegamenti laterali distribuiti lungo le sponde dei corsi d’acqua.

Nei paragrafi successivi vengono descritte le caratteristiche principali del modello.

Si precisa che, a seguito di specifica indicazione del Committente, è stato adottato il Sistema di Coordinate WGS1984-UTM32N per la creazione del dominio di calcolo bidimensionale.

7.4.1 Costruzione della griglia di calcolo

Il dominio di analisi del presente studio idraulico risulta circoscritto, all’interno della piana pisana, all’area compresa tra gli alvei del fiume Arno e del canale Scolmatore. Tale dominio risulta essere già stato oggetto di analisi, e di implementazione della batimetria di calcolo del modello bidimensionale, all’interno degli studi pregressi. In questi termini, pertanto, non è obiettivo del

presente studio l'estensione di tale dominio, quanto piuttosto una migliore rappresentazione e schematizzazione di dettaglio del territorio e del reticolo secondario in esso presente.

In considerazione di ciò, si è quindi proceduto acquisendo la batimetria di calcolo del pregresso modello MIKE 21 già a disposizione del Comune di Pisa, frutto delle analisi della pericolosità idraulica di fiume Arno e Canale Scolmatore, procedendo con l'integrazione all'interno di essa della schematizzazione di dettaglio dei corsi d'acqua oggetto della presente analisi.

Tuttavia, al fine di rendere evidenza del procedimento di costruzione della batimetria di calcolo, prerequisito indispensabile per la corretta integrazione in essa dei canali schematizzati mediante modellazione monodimensionale, si riporta nel seguito in via sintetica quanto precedentemente svolto per l'implementazione della stessa. Tale batimetria è stata successivamente oggetto di accurata indagine e validazione in prossimità dei canali oggetto di studio, al fine sia di rappresentarne al meglio le dinamiche di esondazione degli stessi, sia per gestire correttamente l'integrazione con il modello monodimensionale dei canali.

In un modello bidimensionale alle differenze finite, come MIKE 21, la descrizione geometrica del terreno è eseguita definendo la quota media in ogni cella di calcolo. Tale valore è usualmente calcolato, a partire dai dati rilevati, mediante tecniche di interpolazione. Nel caso in esame, invece, tale valore risulta ricavato a partire dal DTM fornito dal Committente dello studio.

Il dato di partenza sono le tavolette del rilievo LIDAR predisposto dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Il rilievo LIDAR mette a disposizione differenti tipologie di prodotti, di cui il DTM risulta quello di più diretto utilizzo per definire l'altimetria del territorio.

Il DTM risulta, in termini di risoluzione di cella, di due tipologie: quello della fascia costiera ha una risoluzione pari a 2 m mentre quello dei bacini idrografici pari a 1 m. Il DTM complessivo del dominio di studio è stato ottenuto, su piattaforma GIS, attraverso un'operazione di "merge" di tutte le tavole di interesse, avendo preventivamente ricampionato le tavole costiere con una risoluzione di 1m, pari a quella del restante DTM. Tale operazione di "merge" è stata svolta verificando puntualmente che non si generassero sfasamenti o disallineamenti tra tutte le tavole costituenti il dominio, verificandone la corretta localizzazione spaziale, anche rispetto alla cartografia di base.

La Figura 7.5 rappresenta il quadro di unione del DTM LIDAR sovrapposto al territorio dell'area di studio. Nell'immagine sono evidenziati: in rosso il tematismo dei limiti amministrativi dei Comuni della Piana Pisana, con Pisa sulla sinistra; in azzurro il quadro di unione del LIDAR Ministeriale suddiviso tra quello con risoluzione 1m, con trama più fine, e quello della costa con risoluzione 2m, con trama più ampia, visibile nella parte laterale a sinistra dell'immagine; il tematismo del quadro di unione delle tavole LIDAR distinto per Comune, che ricalca sostanzialmente quello Ministeriale, differenziato per colore: Pisa in verde, Cascina in blu, Calci in viola, Pontedera in nero, Calcinai in arancione; quale sfondo è presente la CTR (Carta Tecnica Regionale) dell'area in esame.

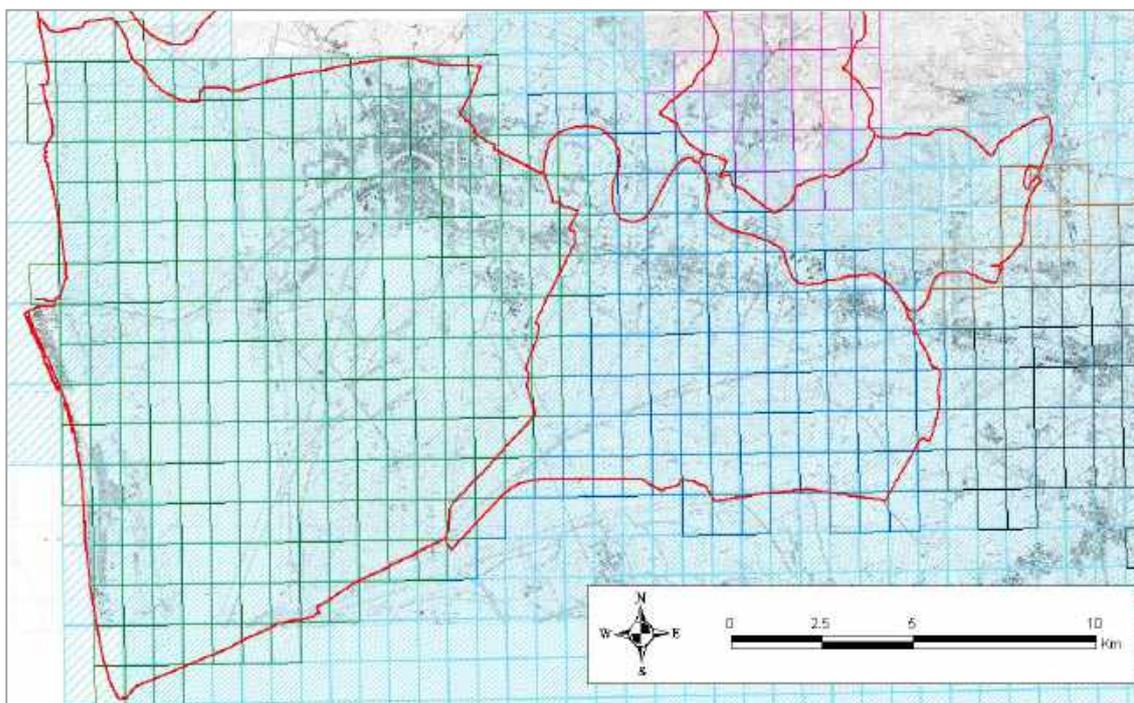


Figura 7.5 Quadro di unione delle Tavole LIDAR dell'area di studio.

La Figura 7.6 rappresenta il DTM totale, ottenuto complessivamente dal “merge” di oltre 400 tavole. Nell'immagine il DTM è rappresentato in scala di grigi, con sovrapposto il tematismo dei limiti amministrativi dei Comuni, in rosso.

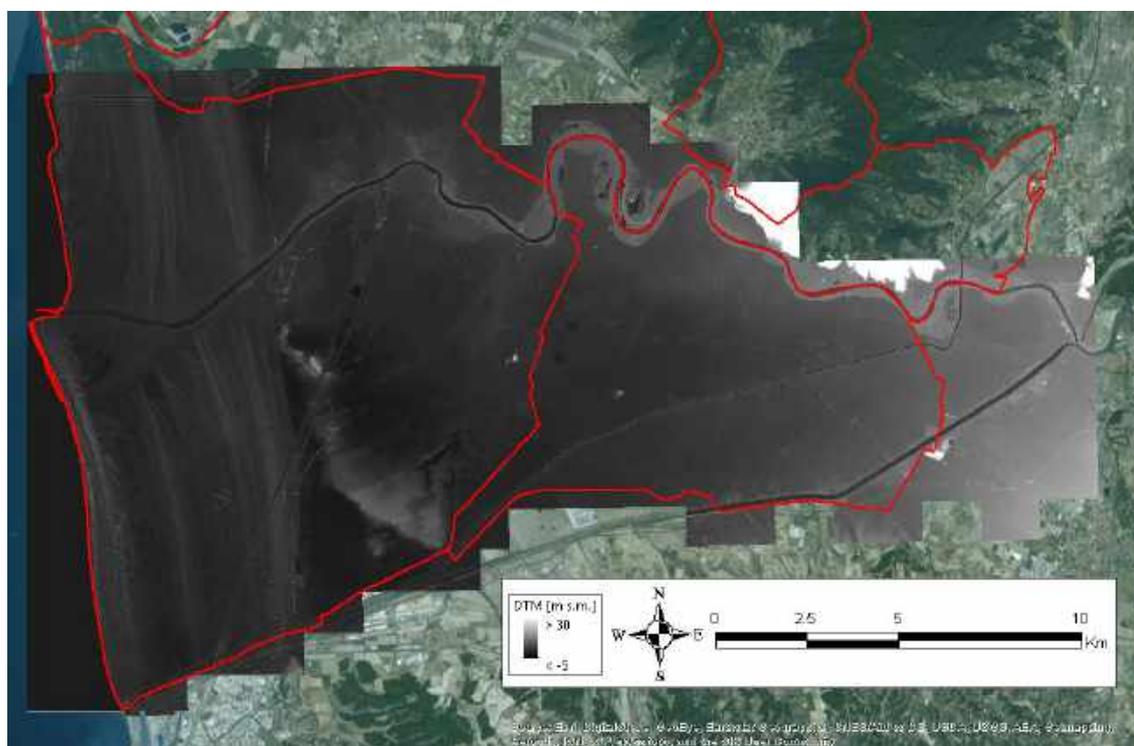


Figura 7.6 DTM totale dell'area di studio costruito dall'unione delle tavole LIDAR.

La Figura 7.7 rappresenta un dettaglio del DTM evidenziante la corretta localizzazione spaziale attraverso un raffronto con la cartografia. Le immagini rappresentano, in rosso, il tematismo in

formato shapefile del reticolo idraulico, sovrapposto a sinistra con la CTR e a destra con il DTM costruito a partire dal LIDAR, in cui le differenti tonalità di colore rappresentano diverse quote del terreno.



Figura 7.7 Immagine di dettaglio della corretta rappresentazione del territorio da parte del DTM.

A seguito della composizione del DTM complessivo, a partire da esso sono state svolte una serie di operazioni di processamento del dato al fine di ottenere la batimetria di calcolo da utilizzare nel modello in MIKE 21.

La prima operazione svolta è stata l'integrazione del DTM, nelle aree in cui tale dato risultava non disponibile, con altre fonti di dati altimetrici, anche se di minor risoluzione. A tal fine è stato utilizzato un ulteriore DTM, datato 2011 e di risoluzione 50x50m, fornito anch'esso dal Committente, con il quale è stato completato il dominio di studio, avendo preliminarmente ricampionato tale dato alla stessa risoluzione del LIDAR.

La seconda operazione svolta è stato il ricampionamento del DTM ad una risoluzione minore, definita in modo tale da mantenere un buon compromesso tra l'ottimizzazione dei tempi di calcolo e il mantenimento di un'elevata accuratezza di rappresentazione del dato altimetrico.

In considerazione dell'estensione del dominio di calcolo (circa 18x28 km) e della dimensione della tipologia di manufatti condizionanti le dinamiche di propagazione degli allagamenti (argini, canali, ecc.) la griglia di calcolo è stata ricampionata con una risoluzione di 5 m.

Al fine di condurre tale operazione è necessario definire con quale procedimento ricampionare a una minor risoluzione cioè, nel caso specifico, come ottenere un valore altimetrico per una cella di dimensioni 5x5m a partire dalle quote delle 25 celle di dimensione 1x1m corrispondenti. In caso di presenza di significativi elementi sovramontanti, cioè elementi in grado di contenere le acque di esondazione quali argini, rilevati stradali, ecc., è opportuno considerare il valore massimo al fine di rappresentare correttamente tale fenomeno: in tal caso la cella dovrà avere il valore massimo delle 25 celle di provenienza. Qualora invece non siano presenti evidenti elementi sovramontanti, è lecito considerare il valor medio, quale valore complessivamente rappresentativo della totalità delle celle originali.

Per identificare in quali punti del dominio effettuare rispettivamente l'operazione di massimo o di media, cioè al fine di identificare gli elementi sovramontanti, gli stessi sono stati evidenziati sul dominio 2D, analizzando una pluralità di fonti: elevati gradienti di quota del DTM stesso, tematismi degli elementi territoriali (reticolo idrografico, elementi antropici), cartografia, approfondimenti di dettaglio attraverso strumenti di visualizzazione 2D e 3D del territorio. A seguito della loro individuazione, sono stata selezionate le celle da associare alle breaklines, in cui si è ritenuto di includere anche tutti gli elementi del reticolo idrografico, al fine di considerare le quote di sponda del reticolo secondario.

La Figura 7.8 rappresenta gli elementi breaklines identificati nel dominio di studio. Nell'immagine, al tematismo complessivo degli elementi sovramontanti, rappresentato in blu, è sovrapposto quello parziale degli argini di Arno e Scolmatore, in rosso, e quello di particolari infrastrutture in rilevato quali autostrade, ferrovie e strade principali, in verde.

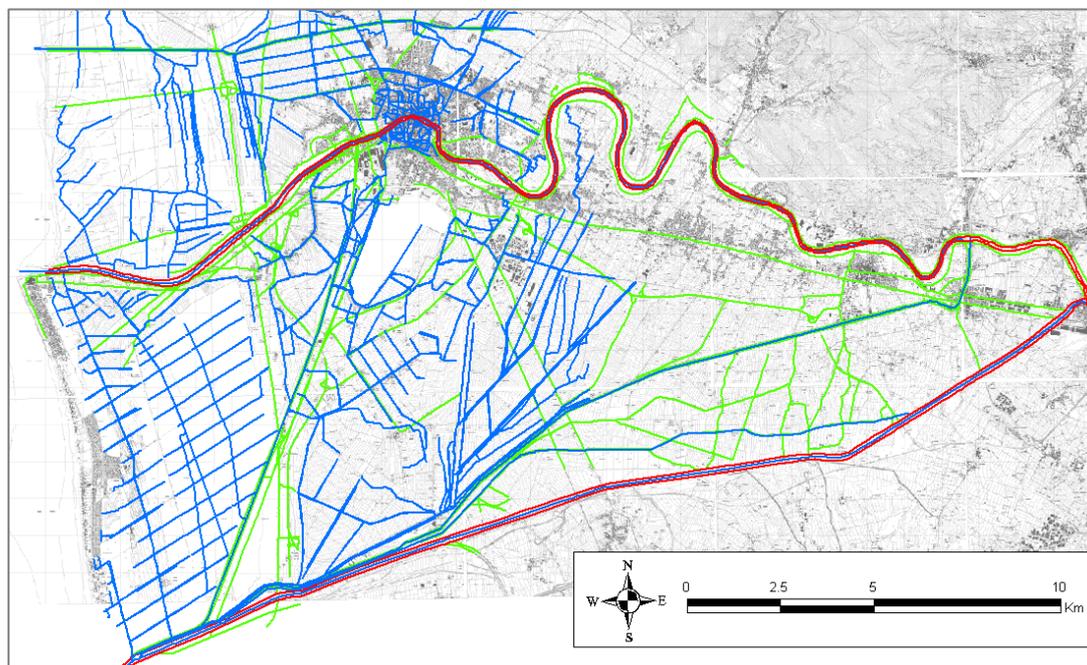


Figura 7.8 Rappresentazione degli elementi definiti come elementi sovramontanti (breaklines) per la costruzione della batimetria di calcolo. Al tematismo delle breaklines totali, in blu, è sovrapposto quello parziale degli argini di Arno e Scolmatore, in rosso, e quello di particolari infrastrutture in rilevato quali autostrade, ferrovie e strade principali, in verde.

Un'ulteriore operazione necessaria, al fine di rappresentare correttamente nella batimetria di calcolo la propagazione degli allagamenti, è l'inserimento di una serie di elementi non rilevati, oppure rilevati in modo scorretto, nel LIDAR. Tali errori od omissioni nel DTM del LIDAR sono dovuti specificamente alla procedura con cui esso viene elaborato. In particolare, può verificarsi che alcuni ponti, specie se di ridotte dimensioni, non vengano "sottratti" al DTM e, più in generale, non risultino rappresentate vie di deflusso degli allagamenti quali sottopassi stradali, sottopassaggi sotto i rilevati, tombinature del reticolo idrografico sottostanti al tracciato stradale e ferroviario. L'inserimento di tali vie di deflusso risulta necessario al fine di rappresentare correttamente la propagazione degli allagamenti nel dominio bidimensionale ed operativamente vengono rappresentati inserendo delle aperture nel rilevato (arginale o stradale).

Inoltre, su indicazione del Committente, sono state apportate modifiche alla batimetria di calcolo per inserire una serie di interventi urbanistici e manufatti recentemente realizzati e non rappresentati nel DTM LIDAR, in parte perché effettuati in data successiva al rilievo ed in parte per motivazioni analoghe a quanto sopradescritto, riguardo alla non corretta rappresentazione del LIDAR di elementi condizionanti le dinamiche di deflusso. Al riguardo è opportuno citare come siano stati inseriti prioritariamente gli interventi situati in aree coinvolte, o comunque in prossimità di esse, dai fenomeni di esondazione analizzati.

Infine, un ulteriore elemento da definire nell'ambito della costruzione della batimetria di calcolo, riguarda l'inserimento degli edifici: il tematismo DTM del LIDAR non rappresenta gli edifici e, in accordo con le indicazioni del Committente e dell'Autorità di Bacino dell'Arno, gli stessi non sono stati inseriti nella batimetria di calcolo con la quale determinare la pericolosità idraulica, ad eccezione delle antiche mura della Città di Pisa.

La seguente Figura 7.9 rappresenta, a titolo esemplificativo per il centro di Pisa, il tematismo degli edifici e quello delle antiche mura di Pisa, nel quale sono state opportunamente considerate tutte le aperture attraverso cui gli allagamenti possono propagarsi.

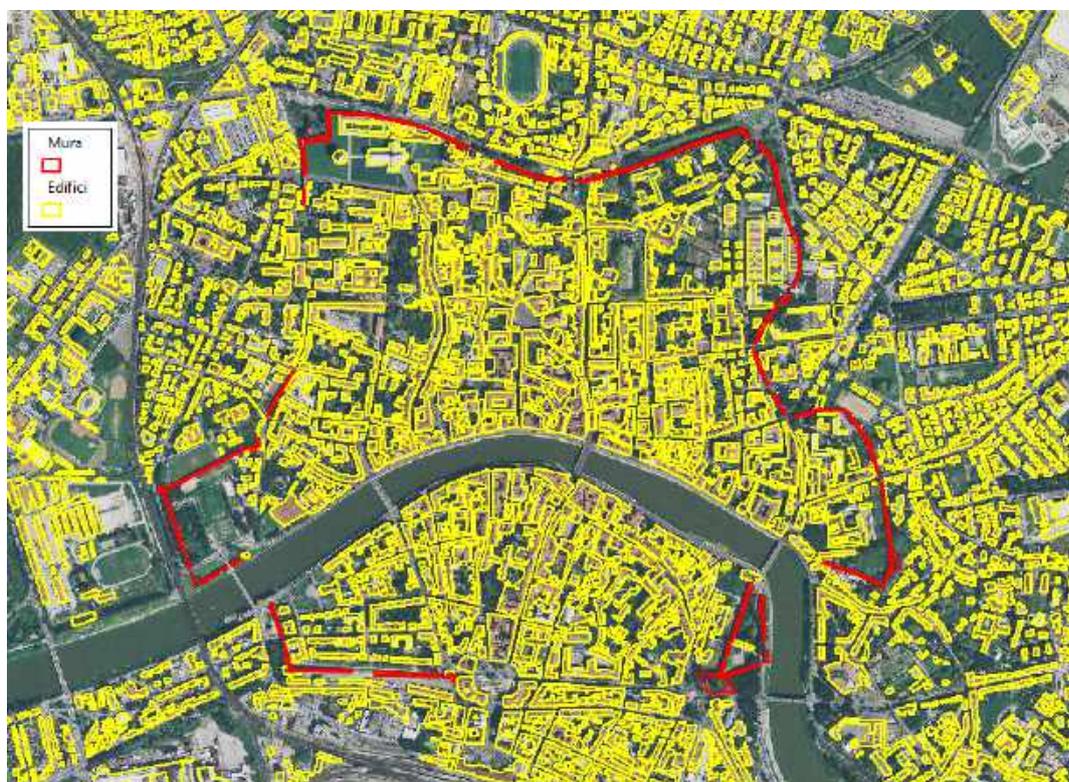


Figura 7.9 Tematismo degli edifici, in giallo, e delle antiche mura, in rosso, nel centro di Pisa. Le mura sono state rappresentate con opportune disconnessioni in corrispondenza delle aperture, attraverso le quali gli allagamenti possono defluire; gli edifici invece non sono stati considerati, in accordo con quanto definito con il Committente e l'Autorità di Bacino.

L'ultima modifica apportata alla batimetria di calcolo è motivata dall'implementazione di un modello accoppiato 1D-2D, in cui l'alveo attivo dei corsi d'acqua oggetto di indagine risulta schematizzato nel modello monodimensionale e le aree circostanti in quello bidimensionale: per tale motivazione occorre escludere dal dominio di calcolo 2D la porzione dei corsi d'acqua già schematizzati nel modello 1D, altrimenti i rispettivi alvei risulterebbero erroneamente rappresentati due volte. Per evitare ciò, le celle rappresentative degli alvei sono state impostate come inattive, adoperando per tale operazione opportuni strumenti di MIKE FLOOD.

Come precedentemente illustrato, al fine dell'ottimizzazione del modello integrato in MIKE FLOOD e delle relative simulazioni, è stata limitata l'estensione del dominio di studio a quello effettivamente interessato dalla possibile esondazione dei canali modellati, eliminando pertanto ciò che ricade a nord dal fiume Arno, assumendo che i relativi argini non vengano raggiunti dalle esondazioni o comunque che costituiscano per esse un limite invalicabile.

La seguente Figura 7.10 rappresenta la batimetria di calcolo completa ottenuta a seguito delle operazioni di processamento del DTM sopradescritte; in rosso sono evidenziate le celle poste come inattive, localizzate, secondo quanto in precedenza illustrato, in corrispondenza dell'alveo dei corsi d'acqua schematizzati in MIKE HYDRO River, a contorno del dominio di studio e nelle aree di non diretto interesse e non coinvolte dalla propagazione degli allagamenti.

Nella successiva Figura 7.11, invece, si riporta un dettaglio della batimetria di calcolo relativa alla zona di confluenza tra il Fosso Caligi e il Fosso Titignano. Anche in questo caso si possono riconoscere le celle poste come inattive, poiché ubicate in corrispondenza dei rispettivi alvei già modellati in MIKE HYDRO River, dalle zone limitrofe modellate invece in MIKE 21.

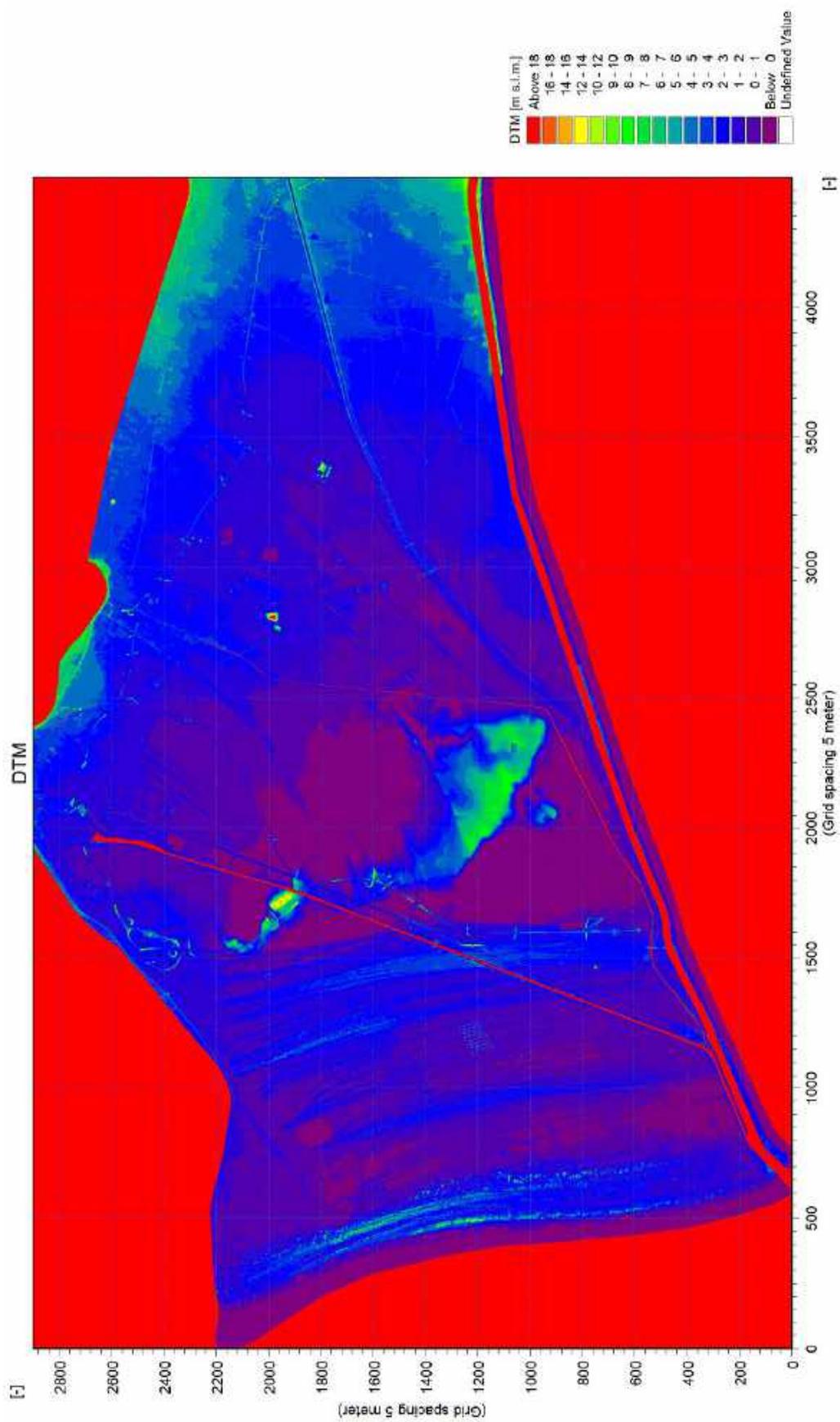


Figura 7.10 Batimetria di calcolo completa dell'intero dominio di studio del modello bidimensionale; in rosso sono evidenziate le celle poste come inattive.

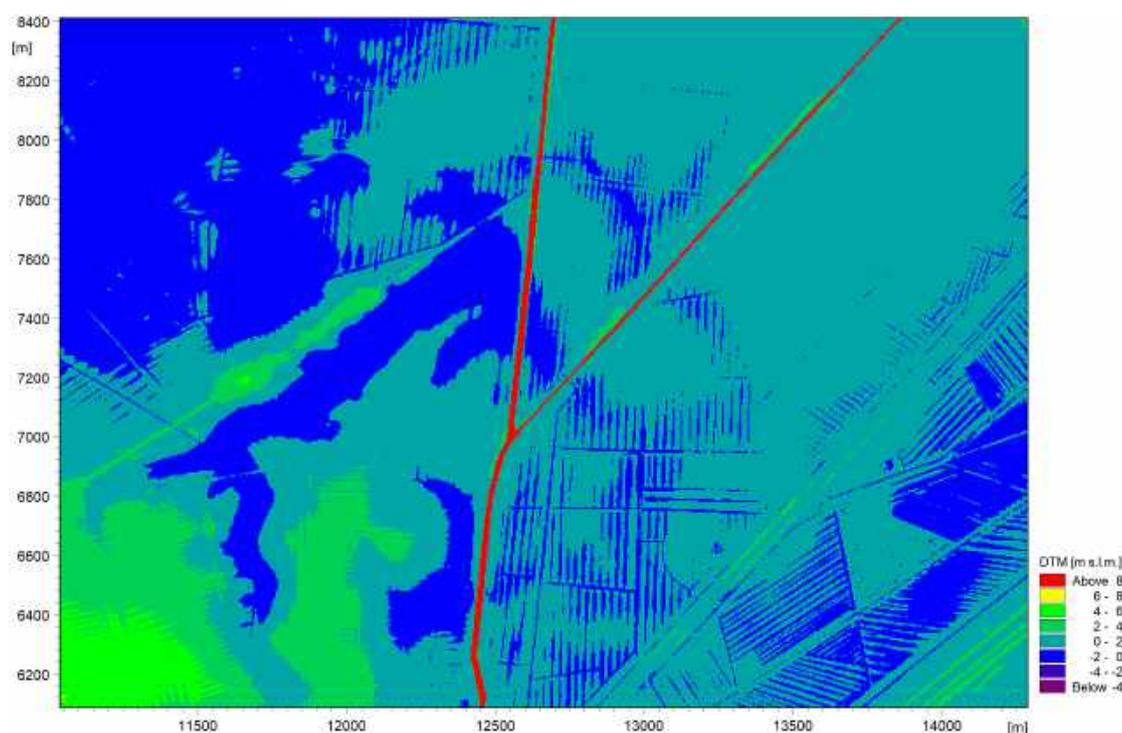


Figura 7.11 Batimetria di calcolo utilizzata nella modellazione bidimensionale, dettaglio sulla confluenza Fosso Titignano – Fosso Caligi; in rosso sono evidenziate le celle poste come inattive.

7.4.2 Definizione dei parametri idrodinamici

7.4.2.1 Condizioni al contorno

Analogamente al modello monodimensionale, anche quello bidimensionale ha necessità di impostare delle condizioni al contorno del dominio di calcolo. Nel caso del modello in esame, la forzante deriva esclusivamente dalle portate non contenute nell'alveo del corso d'acqua durante eventi di piena; di conseguenza non sono state inserite condizioni di monte nel modello 2D.

Relativamente alle condizioni di valle, in termini teorici, avendo già schematizzato il livello del mare all'interno del dominio monodimensionale, non sarebbe necessario definire alcuna condizione. Tuttavia, nel caso le esondazioni superficiali si propaghino al punto da raggiungere le celle poste a contorno del dominio, si genererebbero condizioni idrodinamiche scorrette. Al fine di evitare ciò, avendo verificato con alcune simulazioni di test la concretezza di tale eventualità, si è provveduto ad inserire opportune aperture nelle celle inattive poste a contorno del dominio, definendo presso di esse delle condizioni, in termini di livello costante, tali da consentire il deflusso all'esterno del dominio delle acque superficiali, senza al contempo alternarne i valori nell'area effettivamente oggetto di analisi. A tal fine si specifica che il dominio del modello bidimensionale è stato appositamente creato di estensione maggiore rispetto all'area di indagine, al fine di evitare ogni possibile interferenza delle condizioni al contorno sull'area effettivamente oggetto di analisi.

7.4.2.2 Scabrezza

Il modello MIKE 21 consente di inserire il parametro di scabrezza sia come valore unitario su tutto il dominio, sia attraverso una mappa di valori distribuiti. Nel caso in esame, in analogia con gli studi pregressi, essendo condotta un'analisi a larga scala, senza pertanto la necessità di diversificare in modo dettagliato tale parametro, si è scelto di associare all'intero dominio di studio un unico valore di Gauckler-Strickler costante, pari a $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, ritenuto rappresentativo del

territorio in esame nel suo complesso, senza tuttavia comportare approssimazioni eccessive delle variabili idrodinamiche di maggior rilievo ai fini del presente studio.

7.4.2.3 Viscosità turbolenta

La viscosità turbolenta è legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità e viene simulata nel modello tramite il coefficiente di “eddy viscosity”. Tale parametro varia da 0 a 1 e il codice consente di specificare un valore costante sull'intero dominio di calcolo, oppure di differenziarlo nello spazio tramite una griglia di dimensioni e risoluzione analoghe alla batimetria. Inoltre, è possibile selezionare il tipo di espressione che tiene in conto della viscosità: “flux based” o “velocity based”.

Valori bassi (tendenti a 0) di tale parametro consentono una migliore considerazione delle dinamiche turbolente, dunque a piccola-piccolissima scala, mentre valori tendenti a 1 comportano maggiore stabilità del modello a scapito di una minor dettaglio dei risultati alle scale turbolente.

Nel presente modello si è scelto un coefficiente di eddy viscosity pari a $1 \text{ m}^2/\text{s}$, associato alla formulazione “velocity based”; tale scelta è legata in primo luogo alle finalità dello studio, in cui non sono oggetto di indagine fenomeni turbolenti a piccola scala mentre assume maggiore importanza la stabilità complessiva del modello, in secondo luogo alla dimensione sia complessivamente dell'intero dominio sia della singola cella di calcolo, che determina la risoluzione del modello, indubbiamente di dettaglio ma significativamente maggiore delle scale a cui sono legati i fenomeni turbolenti. La formulazione “velocity based” assicura ad ogni modo una accurata determinazione dei valori di velocità nel dominio bidimensionale.

7.4.2.4 Timestep di simulazione

Il passo di integrazione del modello definisce l'intervallo tra una soluzione delle equazioni del moto e l'altra, effettuata dal codice. In un modello di simulazione è opportuno impostare un intervallo di integrazione sufficientemente basso in modo da ottenere risultati il più possibile dettagliati e affidabili e evitare l'instaurarsi di instabilità numeriche; al contempo occorre mantenere tempi computazionali accettabili e coerenti con le finalità dello studio.

Un indice della bontà dell'intervallo scelto è dato dal numero di Courant, che esprime il numero di celle di griglia interessate dall'informazione (di tirante idrico e flusso) in un timestep di simulazione. Come regola generale, tale fattore dovrebbe essere non superiore a 5.

Dal punto di vista della stabilità numerica del modello, il timestep di simulazione va abbinato alla risoluzione della griglia di calcolo che, nel caso in esame, risulta sufficientemente ridotta da fornire risultati di dettaglio, ma al contempo non eccessivamente da richiedere la definizione di un passo di calcolo estremamente ridotto al fine di evitare l'insorgenza di instabilità.

I tempi computazionali sono invece legati, oltre alla durata dell'intervallo temporale di simulazione, al numero di celle complessivo del dominio di calcolo che, nel presente studio, avendo una risoluzione di cella pari a 5 m e un'area di studio di circa $18 \times 28 \text{ km}$, raggiunge un numero di celle pari a circa 20 milioni.

In considerazione della dimensione del dominio di studio, della risoluzione della griglia di calcolo e della tipologia di fenomeni oggetto di indagine, al fine di ottenere al contempo la stabilità numerica del modello, tempi computazionali accettabili e risultati accurati, è stato impostato un intervallo di integrazione pari a 0.5 secondi. A titolo di confronto, il timestep di simulazione del modello monodimensionale è pari a 1 secondo, valore standard per questa tipologia di studi.

7.5 Accoppiamento modelli 1D-2D

Come descritto in precedenza, i modelli mono e bidimensionale, costruiti originariamente in modo indipendente, sono stati accoppiati all'interno dell'interfaccia MIKE FLOOD. L'accoppiamento richiede la scelta di punti o tratti dove i due modelli si interfaccino, consentendo il trasferimento di volume liquido. Il codice prevede diverse tipologie di interfacciamento, a seconda delle caratteristiche specifiche del collegamento. Nella presente schematizzazione si sono inseriti dei collegamenti longitudinali (denominati "lateral link") lungo tutto il tratto di tutti i canali oggetto di studio, posizionati in corrispondenza delle due sponde dei corsi d'acqua, in modo da comprendere al loro interno l'intero alveo attivo, schematizzato all'interno del modello monodimensionale.

Per tutti i corsi d'acqua analizzati, l'interfaccia di collegamento tra i modelli è stata posta in corrispondenza delle sponde, non essendo presenti, all'interno di essi, vaste aree golenali necessitanti di una modellazione bidimensionale della propagazione dei volumi di piena, ed essendo inoltre tali manufatti correttamente rappresentati sia dal DTM del LIDAR, avendo una dimensione maggiore della risoluzione dello stesso, sia dalla geometria delle sezioni implementate in MIKE HYDRO River, informazioni peraltro tra loro concordi.

Oltre alla localizzazione delle strutture di collegamento, il codice MIKE FLOOD prevede la definizione della tipologia di connessione tra i due modelli, necessaria al fine di individuare la quota di sormonto spondale da utilizzare nell'interfaccia tra i due domini di calcolo. Nel caso specifico, pur comunque risultando le quote dei due modelli tra loro rispettivamente coerenti, si è preferito dare priorità alle informazioni del modello MIKE 21, perché a risoluzione longitudinale maggiore rispetto al dato delle singole sezioni.

7.6 Risultati delle simulazioni idrauliche

Nel presente Paragrafo sono sinteticamente illustrati gli esiti delle simulazioni idrauliche effettuate con il codice di calcolo MIKE FLOOD per i modelli implementati secondo quanto descritto in precedenza. A corredo della seguente descrizione sono fornite, in Allegato A, alcune tabelle contenenti i valori dei principali parametri idrodinamici in corrispondenza di tutte le sezioni dei corsi d'acqua schematizzate in MIKE HYDRO River, per ognuno degli eventi di piena considerati con differenti tempi di ritorno. Inoltre, in Allegato B, sono rappresentate le mappe di tiranti idrici e velocità di scorrimento nel dominio di studio, per ciascuno degli eventi di piena considerati.

Di seguito vengono illustrati i risultati delle analisi idrauliche a fronte di eventi di piena con tempi di ritorno di 30 e 200 anni, utili a definire la pericolosità idraulica a cui è soggetto il territorio secondo le metodologie dell'Autorità di Bacino del fiume Arno.

7.6.1 Evento con tempo di ritorno 30 anni

L'evento di piena con tempo di ritorno 30 anni mostra un progressivo incremento dell'area allagabile e dei tiranti, che raggiungono il loro valore massimo secondo quanto riportato in Figura 7.12 e più in dettaglio nelle tavole dell'Allegato B. Dall'analisi dei risultati emerge come l'esondazione avvenga principalmente a causa del rigurgito dei canali da valle per effetto del livello imposto, alla confluenza, dalla piena del canale Scolmatore, generando il sormonto delle sponde in diversi tratti del reticolo secondario.

Al riguardo, è opportuno evidenziare come l'approccio metodologico adottato sia stato rivolto ad una rappresentazione molto accurata della condizione al contorno imposta alla confluenza, a fronte dell'impatto che essa genera sulle esondazioni. Tale condizione è conseguenza in primo luogo dell'entità dell'evento di piena del canale Scolmatore, per il quale si è fatto riferimento al modello di dettaglio del canale stesso, acquisito dagli studi pregressi, prevedendo inoltre di inserirne una porzione esplicitamente all'interno del presente modello idraulico, al fine di rappresentarne al meglio le dinamiche di deflusso. In secondo luogo, il tirante idrico in alveo nel

canale Scolmatore, in corrispondenza della confluenza con il canale dei Navicelli, è certamente influenzato, nella sua entità, anche dal livello imposto da valle quale condizione al contorno dello sbocco a mare. Al riguardo, il valore di 0.5 m s.m., risulta quello assunto come riferimento dall'ex Autorità di Bacino dell'Arno, così come svolto anche negli studi pregressi, e tale valore non è assolutamente da ritenersi come sovrastimato poiché, in altri contesti del territorio italiano, vengono utilizzate metodologie che portano alla definizione di valori di sovrizzo del livello marino, da considerare quale condizione al contorno per gli eventi di piena, a volte anche maggiori.

In ordine temporale, la prima zona soggetta ad esondazione è quella localizzata in sponda destra della Fossa Chiara, a monte dell'attraversamento stradale della SS1. L'esondazione prosegue verso nord-est, andando ad interessare la porzione sud del bacino di scolo appartenente all'idrovora di Ragnaione. I tiranti idrici in questa zona raggiungono valori variabili, fino ad oltre 2.5 m nelle zone più depresse.

Già nelle prime ore dopo l'inizio dell'evento di piena, si nota come anche il tratto terminale del Canale dei Navicelli inizi ad essere affetto da sormonti spondali, essendo il tratto più prossimo alla gravosa condizione al contorno imposta dallo Scolmatore alla confluenza. Ciò accade in sponda destra, in prossimità dell'idrovora di Calambrone, da cui l'esondazione inizia a propagarsi nella pianura circostante. I volumi di allagamento, inizialmente da qui fuoriusciti, si distribuiscono verso nord, andando a occupare le aree afferenti alle idrovore di Calambrone e Marina di Pisa. I tiranti idrici in questa zona sono tendenzialmente inferiori al metro, a meno di aree localizzate particolarmente depresse dove raggiungono valori maggiori.

In un secondo momento, nella parte alta del Canale dei Navicelli, man mano che il fenomeno di rigurgito a partire dalla confluenza si propaga verso monte, si osservano diversi tratti oggetto di esondazione. Procedendo da monte verso valle, in prossimità dell'idrovora dell'Aeroporto, si osservano sormonti per entrambe le sponde. I volumi di allagamento, che in un primo momento ripercorrono il tracciato dei canali di scolo di queste aree, vanno a distribuirsi lungo tutto il territorio circostante occupando gran parte della zona nord del bacino a scolo meccanico di Coltano, in sponda sinistra, e della Vettola in sponda destra. Proseguendo verso valle, in concomitanza con quanto succede a monte, si osservano esondazioni in prossimità delle idrovore di Vettola e di Ragnaione ripercorrendo, in un primo momento, i canali di scolo delle acque basse, per poi distribuirsi nel territorio circostante.

Il fosso Titignano non risulta inizialmente interessato da sormonti spondali con l'evento di piena trentennale. Successivamente, si osservano fenomeni di esondazione in prossimità della confluenza con il Fosso del Caligi, principalmente in sponda destra. In ogni caso, i tiranti in questa zona risultano modesti, con valori per lo più al di sotto di 1 m.

Relativamente al fosso del Caligi, invece, si osservano in una prima fase allagamenti solamente in prossimità della confluenza con il Fosso Titignano, come già precedentemente descritto, per entrambe le sponde. Tuttavia, mentre in sponda sinistra i tiranti risultano per lo più al di sotto del metro, in sponda destra, invece, i valori sono di circa 1.3 – 1.4 m. In un secondo momento, durante l'evoluzione dell'evento di piena, si osservano esondazioni anche in prossimità della confluenza con la Fossa Chiara, in sponda sinistra, nella zona limitrofa all'idrovora di Arnaccio. In tale area i tiranti risultano di modesta entità, con valori mediamente dell'ordine di 0.3 – 0.5 m.

Dal punto di vista delle velocità di scorrimento, invece, i risultati evidenziano in termini generali, per il complesso delle aree coinvolte dalle esondazioni, valori massimi molto bassi, essendo la dinamica della propagazione degli allagamenti, in questo contesto, un fenomeno sostanzialmente di ridotta velocità, per effetto sia delle debolissime pendenze del territorio e sia della lenta variazione dei valori di livello e portata in alveo, che non comportano pertanto la presenza di comportamenti impulsivi ed elevati valori di velocità di scorrimento. Ciò nonostante, a livello puntuale, in particolare in prossimità dei punti di sormonto spondale, si possono osservare valori leggermente superiori, dell'ordine di 1-1.5 m/s.

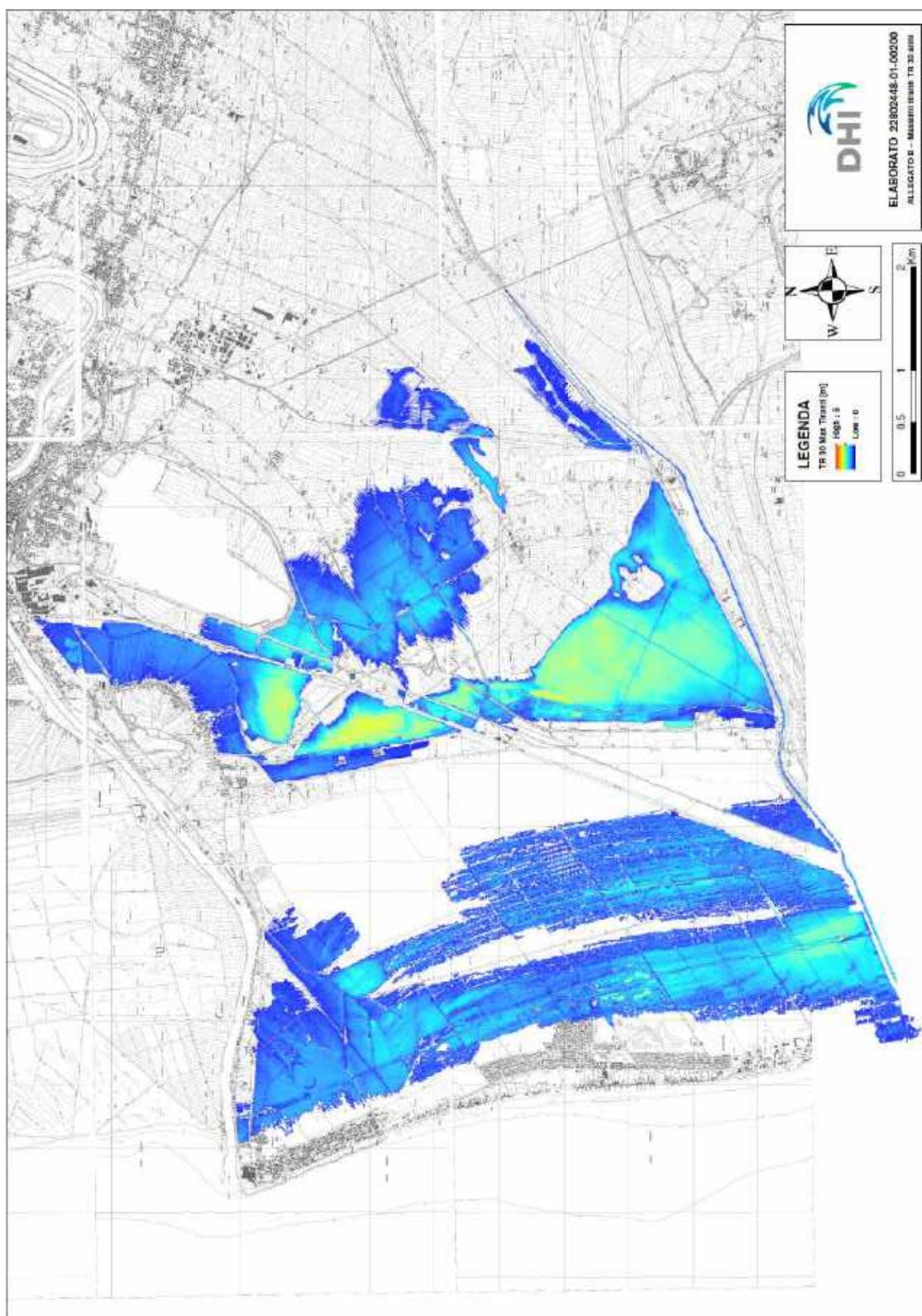


Figura 7.12 Massimi tiranti per l'evento con tempo di ritorno 30 anni (immagine estratta dall'Allegato B).

7.6.2 Evento con tempo di ritorno 200 anni

In analogia con quanto precedentemente descritto per l'evento di piena con tempo di ritorno 30 anni, anche dai risultati della simulazione dell'evento di piena duecentennale emerge come l'esondazione avvenga principalmente a causa del rigurgito dei canali secondari, indotto da valle dal livello imposto alla confluenza dalle condizioni di deflusso nel canale Scolmatore. Si riporta in Figura 7.13, oltreché con maggior dettaglio nelle tavole dell'Allegato B, la mappatura dei massimi tiranti idrici.

La dinamica complessiva, di sormonto delle sponde dei canali e di propagazione dei volumi di allagamento nel territorio circostante, ripercorre in termini generali quanto descritto per l'evento di piena trentennale. In dettaglio, l'estensione dell'area coinvolta dagli allagamenti risulta sostanzialmente comparabile con quella precedentemente illustrata, in quanto non si individuano macro-aree coinvolte solamente dagli allagamenti dell'evento duecentennale, quanto al più un'estensione localmente maggiore di quelle già individuate con l'evento trentennale. In termini di tiranti idrici, invece, per effetto dei maggiori volumi di esondazione, si osservano valori generalmente maggiori, con incrementi rispetto all'evento precedente dell'ordine di circa 10 – 20 cm in tutto il dominio, con localmente valori poco più elevati ma contenuti entro i 60 – 70 cm.

In termini di velocità di scorrimento, invece, si ripropone sostanzialmente quanto già illustrato per l'evento trentennale. La relativa mappatura dei valori massimi nelle aree coinvolte è, analogamente ai tematismi precedenti, proposta in dettaglio nelle tavole dell'Allegato B.

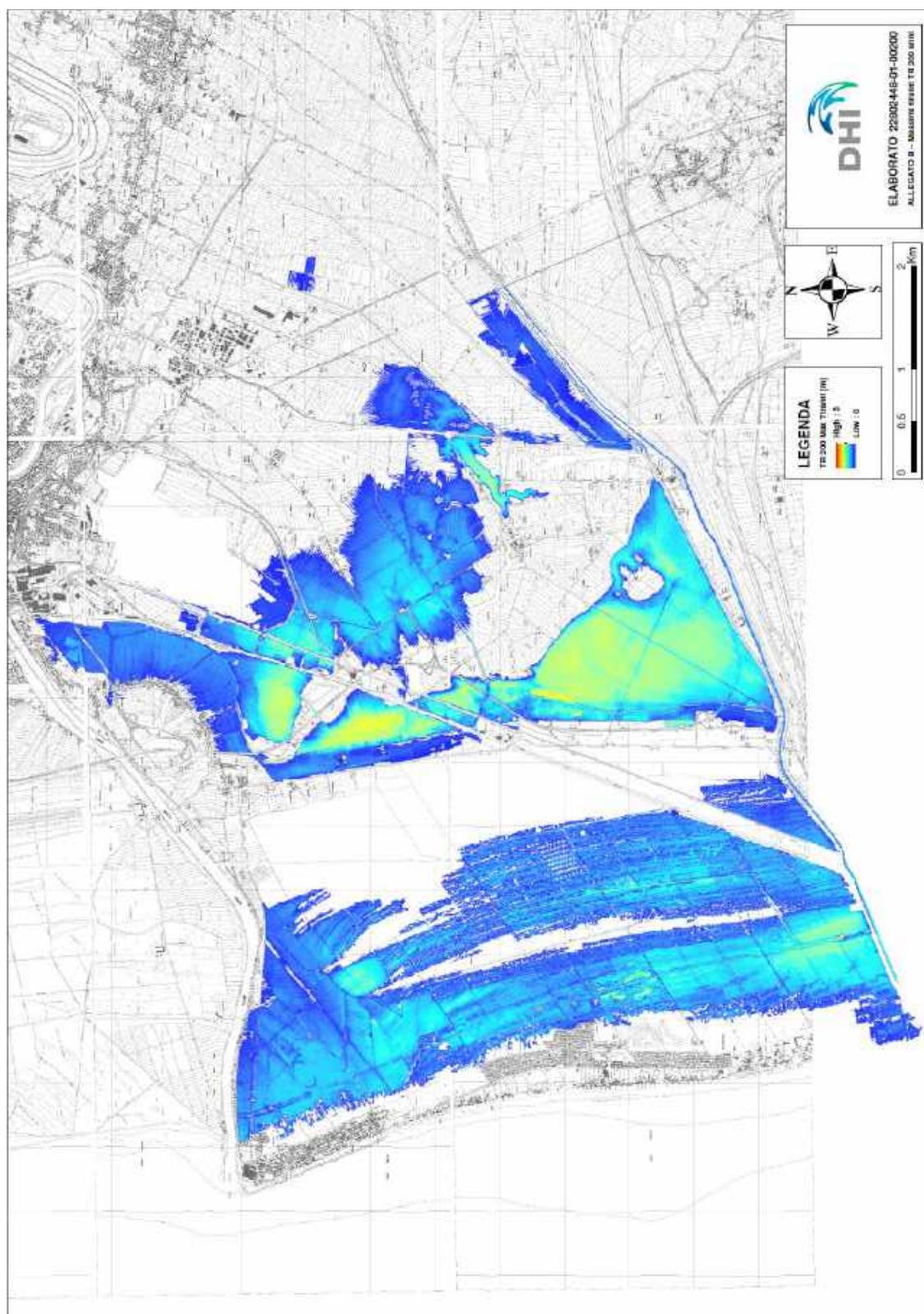


Figura 7.13 Massimi tiranti per l'evento con tempo di ritorno 200 anni (immagine estratta dall'Allegato B).

Un'ulteriore analisi idraulica svolta al fine di migliorare, da parte dell'Amministrazione Comunale, il livello di conoscenza della pericolosità idraulica del territorio, ha riguardato la valutazione della stessa analizzando congiuntamente i valori di tirante idrico e velocità di scorrimento, secondo il principio della magnitudo idraulica.

Secondo la normativa comunitaria, nonché secondo la Legge Regionale Toscana n. 41 del 24/07/2018 "Disposizioni in materia di rischio di alluvioni e di tutela dei corsi d'acqua in attuazione del decreto legislativo 23 febbraio 2010, n. 49 (Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni)", sono da intendersi le seguenti definizioni:

- "magnitudo idraulica": la combinazione del battente e della velocità della corrente in una determinata area, associata allo scenario relativo alle alluvioni poco frequenti;
- "magnitudo idraulica moderata": valori di battente inferiore o uguale a 0,5 metri e velocità inferiore o uguale a 1 metro per secondo (m/s). Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente uguale o inferiori a 0,3 metri;
- "magnitudo idraulica severa": valori di battente inferiore o uguale a 0,5 metri e velocità superiore a 1 metro per secondo (m/s) oppure battente superiore a 0,5 metri e inferiore o uguale a 1 metro e velocità inferiore o uguale a 1 metro per secondo (m/s). Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente superiore a 0,3 metri e inferiore o uguale a 0,5 metri;
- "magnitudo idraulica molto severa": battente superiore a 0,5 metri e inferiore o uguale a 1 metro e velocità superiore a 1 metro per secondo (m/s) oppure battente superiore a 1 metro. Nei casi in cui la velocità non sia determinata battenti superiori a 0,5 metri.

Nel caso specifico della presente analisi idraulica, essendo stati determinati sia i tiranti di allagamento che le velocità di scorrimento, il criterio di definizione della magnitudo idraulica si declina nella combinazione di tiranti (battenti) e velocità di scorrimento degli allagamenti dell'evento duecentennale così come illustrato in Tabella 7.5.

Tabella 7.5 Definizione della magnitudo idraulica dalla combinazione di tiranti e velocità di allagamento.

Combinazione di velocità (righe – in m/s) e tiranti (colonne – in m) di allagamento degli eventi di piena con tempo di ritorno 200 anni per la definizione della magnitudo idraulica			
Velocità (v) \ Tiranti (h)	0 < h ≤ 0.5 (m)	0.5 < h ≤ 1 (m)	h > 1 (m)
0 < v ≤ 1 (m/s)	moderata	severa	molto severa
v > 1 (m/s)	severa	molto severa	molto severa

Il calcolo è stato effettuato, a partire dai risultati della simulazione dell'evento duecentennale svolta con il codice di calcolo MIKE FLOOD, combinando tiranti e velocità per ogni step di calcolo, metodologia alternativa alla semplice combinazione delle mappe dei rispettivi valori massimi, ma più accurata nel rappresentare l'effettiva pericolosità in quanto, normalmente, i valori massimi delle due variabili idrauliche si realizzano in istanti diversi, risultando quindi improprio considerarli coincidenti e trascurando l'eventuale non contemporaneità degli stessi.

Infine è opportuno evidenziare come i valori di magnitudo così calcolati siano da considerarsi come puro output del modello idraulico, senza alcun processamento. Questo comporta che in molte aree si presenti un tematismo di magnitudo prevalente, in cui puntualmente si osservano alcune celle con valore differente, caratterizzate quindi da localmente da una magnitudo differente. In Figura 7.14 è rappresentato il risultato ottenuto.

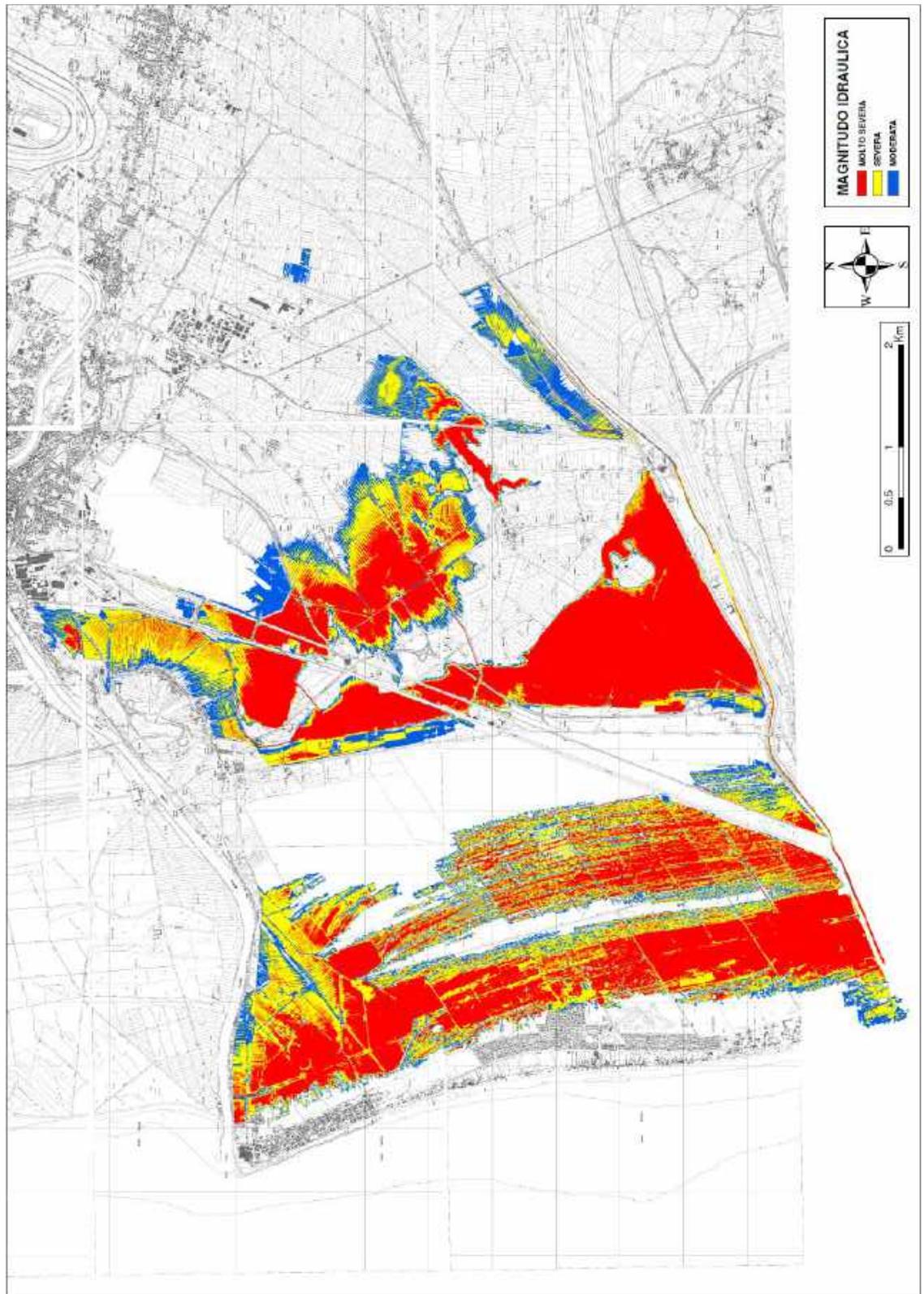


Figura 7.14 Magnitudo idraulica degli allagamenti dei canali del reticolo secondario oggetto di studio.

8 Conclusioni

L'analisi idraulica condotta nel presente studio ha avuto la finalità di rappresentare con buon livello di dettaglio la pericolosità idraulica nella porzione a sud del fiume Arno del territorio comunale di Pisa, per effetto degli eventi di piena con tempo di ritorno 30 e 200 anni dei principali canali del reticolo secondario ivi presente, rappresentato dai corsi d'acqua di Fosso Titignano, Fosso del Caligi, Fossa Chiara e Canale Navigabile dei Navicelli.

A tal fine è stato implementato un modello idrodinamico basato sul codice di calcolo MIKE FLOOD di DHI, con il quale sono stati rappresentati, in maniera dinamicamente accoppiata, i corsi d'acqua sopraccitati, mediante schematizzazione monodimensionale utilizzando il codice MIKE HYDRO River, e il territorio circostante, mediante schematizzazione bidimensionale attraverso il codice MIKE 21.

L'analisi idraulica è stata svolta in seguito all'attenta analisi degli studi pregressi di tipo idrologico e idraulico. Per il Fosso Titignano, risultato sprovvisto di rilievi utili alla schematizzazione nel codice di calcolo del corso d'acqua, è stato appositamente svolto un rilievo topografico di dettaglio lungo la sua intera tratta, in modo da determinare le caratteristiche geometriche delle sezioni e degli attraversamenti presenti.

Al fine di valutare preventivamente le criticità idrauliche della zona, nonché per implementare il piano di indagine del rilievo topografico, è stato anche svolto uno specifico sopralluogo lungo i corsi d'acqua oggetto di studio e nel territorio circostante. In particolare, in fase di sopralluogo, sono state investigate anche una serie di criticità idrauliche relative al reticolo secondario minore nella zona di Ospedaletto, non oggetto della presente modellazione idraulica, ponendo tuttavia le basi per le successive attività che l'Amministrazione e gli altri enti locali coinvolti vorranno intraprendere, in termini di rilievi topografici, modellazioni idrauliche e progettazione degli interventi necessari al fine di superare le criticità riscontrate.

Preliminarmente all'analisi idraulica, infine, è stata svolta un'attività di valutazione idrologica volta a definire nel dettaglio, a partire dai dati ricavati dagli studi pregressi, gli idrogrammi di portata in input nei diversi punti del modello idraulico, sia per quanto riguarda le aree a scolo naturale che per quelle a scolo meccanico.

L'analisi idraulica svolta ha permesso di determinare i tiranti idrici e le velocità di scorrimento delle esondazioni prodotte dagli eventi di piena con tempo di ritorno 30 e 200 anni dei corsi d'acqua oggetto di studio. In particolare, è emerso come la condizione al contorno più gravosa, e conseguentemente maggiormente responsabile dell'entità degli allagamenti, non sia tanto l'entità delle portate in ingresso nei fossi e canali studiati, quanto piuttosto la condizione al contorno di valle data dal livello che, presso la confluenza del Canale dei Navicelli nel Canale Scolmatore, quest'ultimo impone per effetto delle condizioni di deflusso di un suo evento di piena. La conseguenza di ciò è un significativo rigurgito del reticolo di canali secondari in esso afferenti, che conseguentemente manifestano delle insufficienze idrauliche con sormonti spondali e la relativa propagazione nel territorio circostante delle esondazioni prodotte.

Contestualmente alla valutazione della pericolosità idraulica, sono stati consegnati, agli Uffici competenti dell'Amministrazione Comunale di Pisa, i risultati dell'analisi idraulica, in differenti formati di lavoro, nonché i modelli implementati con il codice MIKE FLOOD per i diversi eventi di piena e l'aggiornamento della relativa licenza del software, già in possesso dell'Amministrazione, al fine di poter direttamente consultare e successivamente elaborare i modelli consegnati e i risultati ottenuti: questo consente pertanto al Comune di perseguire l'obiettivo di pervenire ad una serie di risultati fruibili da parte della stessa popolazione, mediante specifiche interfacce di accesso WEB finalizzate alla divulgazione dei risultati ed alla condivisione dei contenuti.

Nel seguito si riepilogano gli esiti del presente studio nella prospettiva dell'Amministrazione Comunale, impegnata da diversi anni in un'attività di approfondimento della conoscenza della pericolosità idraulica del proprio territorio e conseguente condivisione dei risultati ottenuti con la cittadinanza e gli altri Enti territorialmente coinvolti (Autorità di Distretto, Consorzio di Bonifica, Ente gestore del servizio idrico integrato, ecc.):

- Incremento della conoscenza topografica dei corsi d'acqua appartenenti al reticolo secondario, mediante l'acquisizione del rilievo del fosso Titignano, precedentemente non oggetto di rilevamenti recenti. Tale informazione contribuisce pertanto ad incrementare il livello informativo dell'Amministrazione, che costituisce il prerequisito indispensabile per successive attività di verifiche idrauliche e progettazioni di interventi di mitigazione delle criticità presenti. In questi termini, è pertanto auspicabile che tale approfondimento del livello informativo prosegua nel tempo e si estenda in termini di mappatura del reticolo secondario, al fine di poter disporre in maniera sempre più ampia e capillare su tutto il territorio del primo elemento necessario per le successive attività di mitigazione della pericolosità idraulica.
- Approfondimento della conoscenza delle criticità idrauliche locali della zona di Ospedaletto, a seguito del sopralluogo svolto e degli elementi in tale sede raccolti. Quanto emerso dal presente incarico costituisce le basi per le successive attività necessarie al superamento della criticità rilevate, da ritenersi particolarmente importanti non tanto per l'entità delle esondazioni prodotte, trattandosi di reticolo secondario minore, quanto per il fatto che risultano coinvolte aree urbanizzate, pertanto con l'interessamento della popolazione e delle attività produttive ivi ubicate. In questi termini, è auspicabile che l'Amministrazione prosegua nel futuro sia con attività analoghe, di mappatura anche speditiva delle criticità locali in altre porzioni del proprio territorio, sia contestualmente con i successivi approfondimenti finalizzati alla mitigazione di quanto preliminarmente riscontrato.
- Approfondimento del livello di conoscenza in merito al comportamento idraulico del reticolo secondario principale dell'area di Pisa sud, ed in particolare dell'impatto che eventi di piena del Canale Scolmatore hanno sulle condizioni di deflusso di tale reticolo di fossi e canali. Da questo punto di vista, ulteriori approfondimenti permetterebbero all'Amministrazione di determinare quali interventi progettuali potrebbero mitigare tale problematica, che rappresenta una fonte rilevante di pericolosità idraulica per la porzione sud del proprio territorio. In questi termini, è senz'altro auspicabile il coordinamento con gli altri enti specificamente competenti, essendo coinvolto sia il Canale Scolmatore, appartenente al reticolo principale, sia il reticolo secondario che in esso confluisce, sia il canale dei Navicelli, avente la peculiarità di essere navigabile con tutte le implicazioni che ciò può comportare sulla progettazione, realizzazione e gestione dei relativi interventi progettuali.
- In ultimo, il presente studio permette all'Amministrazione comunale di disporre di un ulteriore livello di mappatura della pericolosità idraulica del proprio territorio, andando ad integrare il reticolo secondario con quanto precedentemente implementato dal Comune nella propria piattaforma modellistica, in cui risultano già presenti il fiume Arno, il canale Scolmatore e una porzione significativa della rete di drenaggio di Pisa sud.

ALLEGATI



ALLEGATO A

Tabelle delle grandezze idrodinamiche in alveo



Di seguito si riportano le tabelle relative ai massimi valori idrodinamici in alveo per i corsi d'acqua oggetto di studio. Le tabelle riportano le seguenti informazioni:

- Progressiva: progressiva in [m] della sezione trasversale;
- ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
- Quota fondo: minimo livello altimetrico [m s.m.] delle quote d'alveo;
- Y: tirante idrico in [m];
- PL: livello del pelo libero in [m s.m.];
- V: velocità della corrente in [m/s];
- H: valore del carico totale in [m s.m.].

Fosso Titignano – Tempo di Ritorno 30 anni

Fosso Titignano - TR 30 anni						
Progr.	N.	Q. Fondo	Y	P.L.	V	H
(m)	Sez.	(m s.m.)	(m)	(m s.m.)	(m/s)	(m s.m.)
0.00	P23	1.26	0.58	1.84	6.55	4.02
28.00	P22m	1.16	0.67	1.83	6.50	3.98
32.00	P22v	1.11	0.71	1.82	6.50	3.97
69.00	P21m	1.04	0.76	1.80	6.30	3.82
74.00	P21v	1.02	0.77	1.79	6.30	3.82
107.00	P20m	1.05	0.73	1.78	6.13	3.69
112.00	P20v	1.00	0.77	1.77	6.13	3.68
202.00	P19	1.12	0.61	1.73	5.98	3.55
442.00	P18	0.70	0.92	1.62	5.77	3.32
474.00	P17m	0.57	1.06	1.63	5.51	3.17
484.00	P17v	0.52	1.10	1.62	5.31	3.06
498.00	P16m	0.48	1.14	1.62	5.07	2.93
504.00	P16v	0.43	1.19	1.62	4.87	2.82
542.00	P15m	0.33	1.28	1.61	4.24	2.53
545.00	P15v	0.28	1.33	1.61	3.51	2.24
568.23	S85	0.42	1.19	1.61	3.32	2.17
612.00	P14m	0.36	1.25	1.61	3.20	2.13
622.00	P14v	0.31	1.30	1.61	2.14	1.84
649.12	S83	0.32	1.28	1.60	2.04	1.82
671.00	P13m	0.14	1.46	1.60	1.08	1.66
681.00	P13v	0.09	1.51	1.60	0.84	1.64
841.26	S80	0.15	1.45	1.60	0.68	1.62
1066.27	S77	0.08	1.51	1.59	0.56	1.61
1229.50	P12m	-0.39	1.98	1.59	0.36	1.60
1249.50	P12v	-0.20	1.79	1.59	0.39	1.60
1299.00	P11m	-0.05	1.64	1.59	0.35	1.60
1302.00	P11v	-0.10	1.69	1.59	0.38	1.59
1351.41	S73	-0.07	1.66	1.59	0.33	1.59
1420.00	P10m	-0.24	1.83	1.59	0.28	1.59
1426.00	P10v	-0.29	1.87	1.58	0.35	1.59
1530.00	P9m	-0.10	1.68	1.58	0.42	1.59
1534.00	P9v	-0.15	1.73	1.58	0.37	1.59
1633.63	S69	-0.18	1.76	1.58	0.39	1.59

Fosso Titignano - TR 30 anni						
Progr.	N.	Q. Fondo	Y	P.L.	V	H
(m)	Sez.	(m s.m.)	(m)	(m s.m.)	(m/s)	(m s.m.)
1712.00	P8m	-0.10	1.68	1.58	0.32	1.58
1718.00	P8v	-0.15	1.73	1.58	0.28	1.58
1753.02	S67	-0.41	1.99	1.58	0.21	1.58
1977.68	S64	-0.51	2.06	1.55	0.34	1.55
2128.00	P7m	-0.51	2.05	1.54	0.38	1.55
2132.00	P7v	-0.56	2.09	1.53	0.37	1.54
2279.15	S61	-0.54	2.06	1.52	0.33	1.52
2504.16	S58	-0.63	2.13	1.50	0.35	1.51
2720.64	S55	-0.57	2.06	1.49	0.34	1.49
2945.15	S52	-0.76	2.23	1.47	0.35	1.47
3249.00	P6m	-0.61	2.05	1.44	0.36	1.45
3253.00	P6v	-0.66	2.08	1.42	0.35	1.43
3390.74	S46	-0.63	2.04	1.41	0.40	1.42
3615.75	S43	-0.53	1.92	1.39	0.37	1.39
3850.04	S39	-0.63	1.99	1.36	0.38	1.37
3856.00	P5m	-0.66	2.03	1.37	0.26	1.37
3866.00	P5v	-0.71	2.07	1.36	0.25	1.37
3883.02	S38	-0.49	1.85	1.36	0.37	1.37
4103.08	S35	-0.31	1.62	1.31	0.49	1.33
4403.10	S31	-0.44	1.69	1.25	0.46	1.26
4456.00	P4m	-0.49	1.73	1.24	0.51	1.25
4462.00	P4v	-0.54	1.77	1.23	0.49	1.24
4476.00	P3m	-0.55	1.77	1.22	0.58	1.23
4481.00	P3v	-0.60	1.81	1.21	0.55	1.22
4553.12	S30	-0.35	1.54	1.19	0.54	1.20
4853.14	S26	-0.55	1.67	1.12	0.47	1.13
5053.16	S23	-0.64	1.74	1.10	0.37	1.10
5119.00	P2m	-1.02	2.11	1.09	0.31	1.10
5124.00	P2v	-1.07	2.15	1.08	0.30	1.09
5352.75	S19	-0.91	1.97	1.06	0.44	1.07
5650.68	S15	-1.05	2.11	1.06	0.34	1.06
5953.23	S11	-1.06	2.11	1.05	0.34	1.06
6253.24	S7	-0.99	2.03	1.04	0.33	1.05
6553.25	S4	-1.16	2.20	1.04	0.12	1.04
6703.26	S2	-1.07	2.11	1.04	0.26	1.04
6753.00	P1m	-1.15	2.19	1.04	0.32	1.04
6757.00	P1v	-1.20	2.24	1.04	0.31	1.04
6820.00	S1	-0.91	1.94	1.03	0.30	1.04

Fosso Caligi – Tempo di Ritorno 30 anni

Fosso Caligi - TR 30 anni						
Progr.	N.	Q. Fondo	Y	P.L.	V	H
(m)	Sez.	(m s.m.)	(m)	(m s.m.)	(m/s)	(m s.m.)
0.00	2	-0.02	1.19	1.17	0.35	1.18
719.91	13	-0.12	1.23	1.11	0.30	1.11
725.81	14m	0.15	0.96	1.11	0.29	1.11
745.81	14v	0.10	1.00	1.10	0.27	1.11
768.92	15	-0.15	1.25	1.10	0.28	1.11
1168.57	19	-0.16	1.24	1.08	0.31	1.08
1252.60	20m	-0.15	1.22	1.07	0.37	1.08
1272.60	20v	-0.20	1.26	1.06	0.36	1.07
1274.41	21	-0.12	1.18	1.06	0.33	1.07
1476.99	24	-0.28	1.33	1.05	0.31	1.05
1485.81	25m	-0.20	1.24	1.04	0.34	1.05
1505.81	25v	-0.25	1.29	1.04	0.33	1.04
1568.97	26	-0.20	1.24	1.04	0.30	1.04
2069.34	32	-0.18	1.20	1.02	0.28	1.02
2084.47	33m	-0.20	1.22	1.02	0.27	1.02
2104.47	33v	-0.25	1.26	1.01	0.25	1.02
2169.10	34	-0.14	1.15	1.01	0.29	1.02
2369.64	36	-0.21	1.22	1.01	0.30	1.01
2398.69	37m	-0.17	1.18	1.01	0.29	1.01
2418.69	37v	-0.22	1.23	1.01	0.28	1.01
2422.57	38	-0.30	1.31	1.01	0.28	1.01
2860.62	43	-0.26	1.26	1.00	0.21	1.00
3369.11	48	-0.37	1.37	1.00	0.29	1.00
3865.23	53	-0.38	1.38	1.00	0.50	1.01
3979.49	54	-0.35	1.35	1.00	0.34	1.01
4369.24	58	-0.42	1.43	1.01	0.05	1.01
4448.76	59m	-0.47	1.48	1.01	0.09	1.01
4462.00	59v	-0.52	1.54	1.02	0.08	1.02
4468.97	60	-0.52	1.55	1.03	0.06	1.03
4514.22	61	-0.81	1.84	1.03	0.05	1.03
4568.21	62	-0.60	1.64	1.04	0.13	1.04
5067.86	67	-0.71	1.75	1.04	0.09	1.04
5405.99	73	-1.11	2.15	1.04	0.10	1.04
5857.55	78	-1.05	2.10	1.05	0.25	1.05
6467.92	84	-0.65	1.70	1.05	0.33	1.05
6820.00	89	-0.71	1.76	1.05	0.39	1.05
6878.00	89bis	-0.76	1.81	1.05	0.36	1.05

Fossa Chiara – Tempo di Ritorno 30 anni

Fossa Chiara - TR 30 anni						
Progr.	N.	Q. Fondo	Y	P.L.	V	H
(m)	Sez.	(m s.m.)	(m)	(m s.m.)	(m/s)	(m s.m.)
0.00	52bis	-0.76	1.81	1.05	0.69	1.07
31.02	52	-0.89	1.93	1.04	0.63	1.06
309.10	55	-1.12	2.16	1.04	0.62	1.06
315.00	56m	-1.21	2.25	1.04	0.58	1.06
323.00	56v	-1.25	2.29	1.04	0.57	1.06
388.06	57	-0.96	2.00	1.04	0.54	1.05
688.47	61	-0.76	1.80	1.04	0.50	1.05
1188.54	66	-0.84	1.88	1.04	0.35	1.04
1587.83	70	-0.96	2.00	1.04	0.32	1.04
1873.25	73	-1.13	2.17	1.04	0.31	1.04
1883.14	74m	-1.43	2.46	1.04	0.29	1.04
1903.14	74v	-1.48	2.51	1.04	0.28	1.04
1989.60	75	-1.03	2.07	1.04	0.31	1.04
2389.42	79	-1.20	2.24	1.04	0.31	1.04
2845.10	84	-1.44	2.48	1.04	0.28	1.04
2923.01	86	-1.39	2.43	1.04	0.29	1.04
3388.24	91	-1.22	2.26	1.04	0.14	1.04
3738.68	95	-1.17	2.21	1.04	0.01	1.04
4088.60	99	-1.38	2.43	1.05	0.01	1.05
4491.27	104	-1.48	2.53	1.05	0.01	1.05
4513.40	105m	-1.15	2.20	1.05	0.02	1.05
4533.40	105v	-1.20	2.26	1.06	0.02	1.06
4588.37	106	-1.44	2.51	1.07	0.01	1.07
4942.71	109	-1.61	2.68	1.07	0.01	1.07
5022.94	110m	-1.55	2.62	1.07	0.03	1.07
5042.94	110v	-1.60	2.67	1.07	0.03	1.07
5104.06	111	-1.59	2.68	1.09	0.01	1.09
5471.00	115	-1.53	2.63	1.10	0.02	1.10
6066.66	120	-1.84	2.99	1.15	0.02	1.15
6643.94	124	-1.72	2.92	1.20	0.01	1.20
6971.27	127	-1.90	3.12	1.22	0.02	1.22
7002.36	128m	-0.14	1.36	1.22	0.09	1.22
7022.36	128v	-0.14	1.58	1.44	0.09	1.44
7061.47	129	-2.00	3.57	1.57	0.02	1.57
7424.66	133	-1.00	2.61	1.61	0.03	1.61
7429.84	134m	-0.95	2.57	1.62	0.02	1.62
7439.85	134v	-1.00	2.63	1.63	0.02	1.63
7449.85	Confl	-3.30	4.94	1.64	0.01	1.64

Canale Navicelli – Tempo di Ritorno 30 anni

Canale Navicelli - TR 30 anni						
Progr. (m)	N. Sez.	Q. Fondo (m s.m.)	Y (m)	P.L. (m s.m.)	V (m/s)	H (m s.m.)
0.00	sez1	-2.60	4.06	1.46	0.01	1.46
500.00	sez2	-2.50	3.96	1.46	0.01	1.46
850.00	sez3	-2.48	3.94	1.46	0.01	1.46
1500.00	sez4	-2.50	3.96	1.46	0.01	1.46
2000.00	sez5	-2.58	4.04	1.46	0.07	1.46
2236.00	sez6	-2.48	3.94	1.46	0.14	1.46
2500.00	sez7	-2.64	4.10	1.46	0.18	1.46
3000.00	sez8	-2.66	4.12	1.46	0.24	1.46
3500.00	sez9	-2.68	4.14	1.46	0.22	1.46
4000.00	sez10	-2.74	4.20	1.46	0.20	1.46
4251.00	sez11	-2.75	4.21	1.46	0.21	1.46
4500.00	sez12	-2.76	4.22	1.46	0.22	1.46
5000.00	sez13	-2.78	4.24	1.46	0.19	1.47
5500.00	sez14	-2.80	4.27	1.47	0.18	1.47
6000.00	sez15	-2.82	4.29	1.47	0.23	1.48
6223.00	sez16	-2.83	4.31	1.48	0.22	1.48
6500.00	sez17	-2.84	4.33	1.49	0.29	1.50
7000.00	sez18	-2.86	4.36	1.50	0.38	1.51
7500.00	sez19	-2.88	4.39	1.51	0.35	1.52
8000.00	sez20	-2.90	4.42	1.52	0.34	1.53
8500.00	sez21	-2.95	4.48	1.53	0.35	1.54
9000.00	sez22	-3.00	4.54	1.54	0.33	1.54
9500.00	sez23	-3.05	4.60	1.55	0.33	1.55
10000.00	sez24	-3.10	4.65	1.55	0.32	1.56
10500.00	sez25	-3.15	4.71	1.56	0.31	1.57
11000.00	sez26	-3.18	4.75	1.57	0.31	1.58
11500.00	sez27	-3.20	4.78	1.58	0.30	1.58
12000.00	sez28	-3.23	4.82	1.59	0.31	1.60
12500.00	sez29	-3.25	4.88	1.63	0.30	1.63
12633.00	sez30	-3.30	4.94	1.64	0.27	1.64
13000.00	sez31	-3.33	5.00	1.67	0.19	1.67
13500.00	sez32	-3.36	5.11	1.75	0.23	1.76
14000.00	sez33	-3.36	5.26	1.90	0.30	1.90
14500.00	sez34	-1.75	3.77	2.02	0.28	2.02

Fosso Titignano – Tempo di Ritorno 200 anni

Fosso Titignano - TR 200 anni						
Progr.	N.	Q. Fondo	Y	P.L.	V	H
(m)	Sez.	(m s.m.)	(m)	(m s.m.)	(m/s)	(m s.m.)
0.00	P23	1.26	0.85	2.11	6.65	4.36
28.00	P22m	1.16	0.94	2.10	6.60	4.32
32.00	P22v	1.11	0.98	2.09	6.60	4.31
69.00	P21m	1.04	1.04	2.08	6.40	4.17
74.00	P21v	1.02	1.05	2.07	6.40	4.16
107.00	P20m	1.05	1.01	2.06	6.23	4.04
112.00	P20v	1.00	1.05	2.05	6.23	4.03
202.00	P19	1.12	0.91	2.03	6.08	3.91
442.00	P18	0.70	1.25	1.95	5.87	3.71
474.00	P17m	0.57	1.38	1.95	5.81	3.67
484.00	P17v	0.52	1.43	1.95	5.61	3.55
498.00	P16m	0.48	1.47	1.95	5.07	3.26
504.00	P16v	0.43	1.51	1.94	4.87	3.15
542.00	P15m	0.33	1.61	1.94	4.74	3.09
545.00	P15v	0.28	1.65	1.93	3.51	2.56
568.23	S85	0.42	1.51	1.93	3.32	2.49
612.00	P14m	0.36	1.57	1.93	3.20	2.45
622.00	P14v	0.31	1.62	1.93	2.14	2.16
649.12	S83	0.32	1.60	1.92	2.04	2.14
671.00	P13m	0.14	1.79	1.93	1.08	1.98
681.00	P13v	0.09	1.83	1.92	0.84	1.96
841.26	S80	0.15	1.77	1.92	0.74	1.94
1066.27	S77	0.08	1.83	1.91	0.66	1.94
1229.50	P12m	-0.39	2.30	1.91	0.46	1.92
1249.50	P12v	-0.20	2.11	1.91	0.49	1.92
1299.00	P11m	-0.05	1.96	1.91	0.45	1.92
1302.00	P11v	-0.10	2.01	1.91	0.38	1.91
1351.41	S73	-0.07	1.97	1.90	0.43	1.91
1420.00	P10m	-0.24	2.14	1.90	0.38	1.91
1426.00	P10v	-0.29	2.19	1.90	0.35	1.90
1530.00	P9m	-0.10	2.00	1.90	0.42	1.90
1534.00	P9v	-0.15	2.04	1.89	0.47	1.90
1633.63	S69	-0.18	2.07	1.89	0.49	1.90
1712.00	P8m	-0.10	1.99	1.89	0.32	1.90
1718.00	P8v	-0.15	2.04	1.89	0.28	1.89
1753.02	S67	-0.41	2.30	1.89	0.26	1.89
1977.68	S64	-0.51	2.35	1.84	0.43	1.85
2128.00	P7m	-0.51	2.34	1.83	0.48	1.84
2132.00	P7v	-0.56	2.37	1.81	0.46	1.82
2279.15	S61	-0.54	2.33	1.79	0.42	1.80
2504.16	S58	-0.63	2.40	1.77	0.45	1.78
2720.64	S55	-0.57	2.32	1.75	0.44	1.75
2945.15	S52	-0.76	2.48	1.72	0.42	1.73
3249.00	P6m	-0.61	2.30	1.69	0.42	1.70
3253.00	P6v	-0.66	2.33	1.67	0.41	1.68

Fosso Titignano - TR 200 anni						
Progr.	N.	Q. Fondo	Y	P.L.	V	H
(m)	Sez.	(m s.m.)	(m)	(m s.m.)	(m/s)	(m s.m.)
3390.74	S46	-0.63	2.28	1.65	0.48	1.66
3615.75	S43	-0.53	2.15	1.62	0.43	1.63
3850.04	S39	-0.63	2.22	1.59	0.47	1.60
3856.00	P5m	-0.66	2.26	1.60	0.33	1.60
3866.00	P5v	-0.71	2.30	1.59	0.32	1.60
3883.02	S38	-0.49	2.08	1.59	0.44	1.59
4103.08	S35	-0.31	1.85	1.54	0.54	1.55
4403.10	S31	-0.44	1.91	1.47	0.53	1.48
4456.00	P4m	-0.49	1.94	1.45	0.60	1.47
4462.00	P4v	-0.54	1.97	1.43	0.58	1.45
4476.00	P3m	-0.55	1.97	1.42	0.69	1.44
4481.00	P3v	-0.60	2.01	1.41	0.66	1.43
4553.12	S30	-0.35	1.74	1.39	0.61	1.41
4853.14	S26	-0.55	1.87	1.32	0.55	1.33
5053.16	S23	-0.64	1.92	1.28	0.46	1.29
5119.00	P2m	-1.02	2.30	1.28	0.39	1.29
5124.00	P2v	-1.07	2.34	1.27	0.38	1.27
5352.75	S19	-0.91	2.14	1.23	0.55	1.25
5650.68	S15	-1.05	2.27	1.22	0.39	1.23
5953.23	S11	-1.06	2.27	1.21	0.39	1.22
6253.24	S7	-0.99	2.19	1.20	0.40	1.21
6553.25	S4	-1.16	2.36	1.20	0.15	1.20
6703.26	S2	-1.07	2.27	1.20	0.31	1.20
6753.00	P1m	-1.15	2.34	1.19	0.44	1.20
6757.00	P1v	-1.20	2.39	1.19	0.43	1.20
6820.00	S1	-0.91	2.10	1.19	0.40	1.19

Fosso Caligi – Tempo di Ritorno 200 anni

Fosso Caligi - TR 200 anni						
Progr. (m)	N. Sez.	Q. Fondo (m s.m.)	Y (m)	P.L. (m s.m.)	V (m/s)	H (m s.m.)
0.00	2	-0.02	1.44	1.42	0.43	1.43
719.91	13	-0.12	1.45	1.33	0.38	1.34
725.81	14m	0.15	1.18	1.33	0.37	1.33
745.81	14v	0.10	1.22	1.32	0.35	1.33
768.92	15	-0.15	1.47	1.32	0.36	1.33
1168.57	19	-0.16	1.44	1.28	0.42	1.29
1252.60	20m	-0.15	1.41	1.26	0.52	1.28
1272.60	20v	-0.20	1.45	1.25	0.51	1.26
1274.41	21	-0.12	1.38	1.25	0.44	1.26
1476.99	24	-0.28	1.51	1.23	0.41	1.24
1485.81	25m	-0.20	1.42	1.22	0.48	1.24
1505.81	25v	-0.25	1.47	1.22	0.47	1.23
1568.97	26	-0.20	1.41	1.21	0.41	1.22
2069.34	32	-0.18	1.34	1.16	0.39	1.17
2084.47	33m	-0.20	1.36	1.16	0.38	1.17
2104.47	33v	-0.25	1.40	1.15	0.37	1.16
2169.10	34	-0.14	1.29	1.15	0.41	1.16
2369.64	36	-0.21	1.35	1.14	0.41	1.15
2398.69	37m	-0.17	1.31	1.14	0.42	1.15
2418.69	37v	-0.22	1.36	1.14	0.41	1.15
2422.57	38	-0.30	1.44	1.14	0.39	1.15
2860.62	43	-0.26	1.39	1.13	0.29	1.14
3369.11	48	-0.37	1.50	1.13	0.29	1.13
3865.23	53	-0.38	1.50	1.12	0.50	1.14
3979.49	54	-0.35	1.47	1.12	0.54	1.14
4369.24	58	-0.42	1.57	1.15	0.35	1.16
4448.76	59m	-0.47	1.60	1.13	0.74	1.16
4462.00	59v	-0.52	1.67	1.15	0.38	1.16
4468.97	60	-0.52	1.69	1.17	0.06	1.17
4514.22	61	-0.81	2.00	1.19	0.05	1.19
4568.21	62	-0.60	1.79	1.19	0.13	1.19
5067.86	67	-0.71	1.91	1.20	0.09	1.20
5405.99	73	-1.11	2.32	1.21	0.10	1.21
5857.55	78	-1.05	2.27	1.22	0.25	1.22
6467.92	84	-0.65	1.87	1.22	0.43	1.23
6820.00	89	-0.71	1.94	1.23	0.39	1.24
6878.00	89bis	-0.76	1.99	1.23	0.46	1.24

Fossa Chiara – Tempo di Ritorno 200 anni

Fossa Chiara - TR 200 anni						
Progr.	N.	Q. Fondo	Y	P.L.	V	H
(m)	Sez.	(m s.m.)	(m)	(m s.m.)	(m/s)	(m s.m.)
0.00	52bis	-0.76	1.99	1.23	0.79	1.26
31.02	52	-0.89	2.12	1.23	0.74	1.26
309.10	55	-1.12	2.35	1.23	0.75	1.26
315.00	56m	-1.21	2.44	1.23	0.71	1.26
323.00	56v	-1.25	2.48	1.23	0.69	1.25
388.06	57	-0.96	2.19	1.23	0.61	1.25
688.47	61	-0.76	1.99	1.23	0.59	1.25
1188.54	66	-0.84	2.07	1.23	0.40	1.24
1587.83	70	-0.96	2.19	1.23	0.34	1.24
1873.25	73	-1.13	2.36	1.23	0.38	1.24
1883.14	74m	-1.43	2.66	1.23	0.33	1.24
1903.14	74v	-1.48	2.71	1.23	0.33	1.24
1989.60	75	-1.03	2.26	1.23	0.36	1.24
2389.42	79	-1.20	2.43	1.23	0.35	1.24
2845.10	84	-1.44	2.67	1.23	0.28	1.24
2923.01	86	-1.39	2.62	1.23	0.29	1.24
3388.24	91	-1.22	2.45	1.23	0.24	1.24
3738.68	95	-1.17	2.41	1.24	0.01	1.24
4088.60	99	-1.38	2.63	1.25	0.01	1.25
4491.27	104	-1.48	2.74	1.26	0.01	1.26
4513.40	105m	-1.15	2.41	1.26	0.02	1.26
4533.40	105v	-1.20	2.46	1.26	0.02	1.26
4588.37	106	-1.44	2.71	1.27	0.01	1.27
4942.71	109	-1.61	2.89	1.28	0.01	1.28
5022.94	110m	-1.55	2.83	1.28	0.03	1.28
5042.94	110v	-1.60	2.88	1.28	0.03	1.28
5104.06	111	-1.59	2.89	1.30	0.01	1.30
5471.00	115	-1.53	2.84	1.31	0.02	1.31
6066.66	120	-1.84	3.19	1.35	0.02	1.35
6643.94	124	-1.72	3.10	1.38	0.01	1.38
6971.27	127	-1.90	3.28	1.38	0.02	1.38
7002.36	128m	-0.14	1.51	1.37	0.34	1.38
7022.36	128v	-0.14	1.60	1.46	0.09	1.46
7061.47	129	-2.00	3.59	1.59	0.02	1.59
7424.66	133	-1.00	2.62	1.62	0.03	1.62
7429.84	134m	-0.95	2.59	1.64	0.02	1.64
7439.85	134v	-1.00	2.65	1.65	0.02	1.65
7449.85	Confl	-3.30	4.96	1.66	0.01	1.66

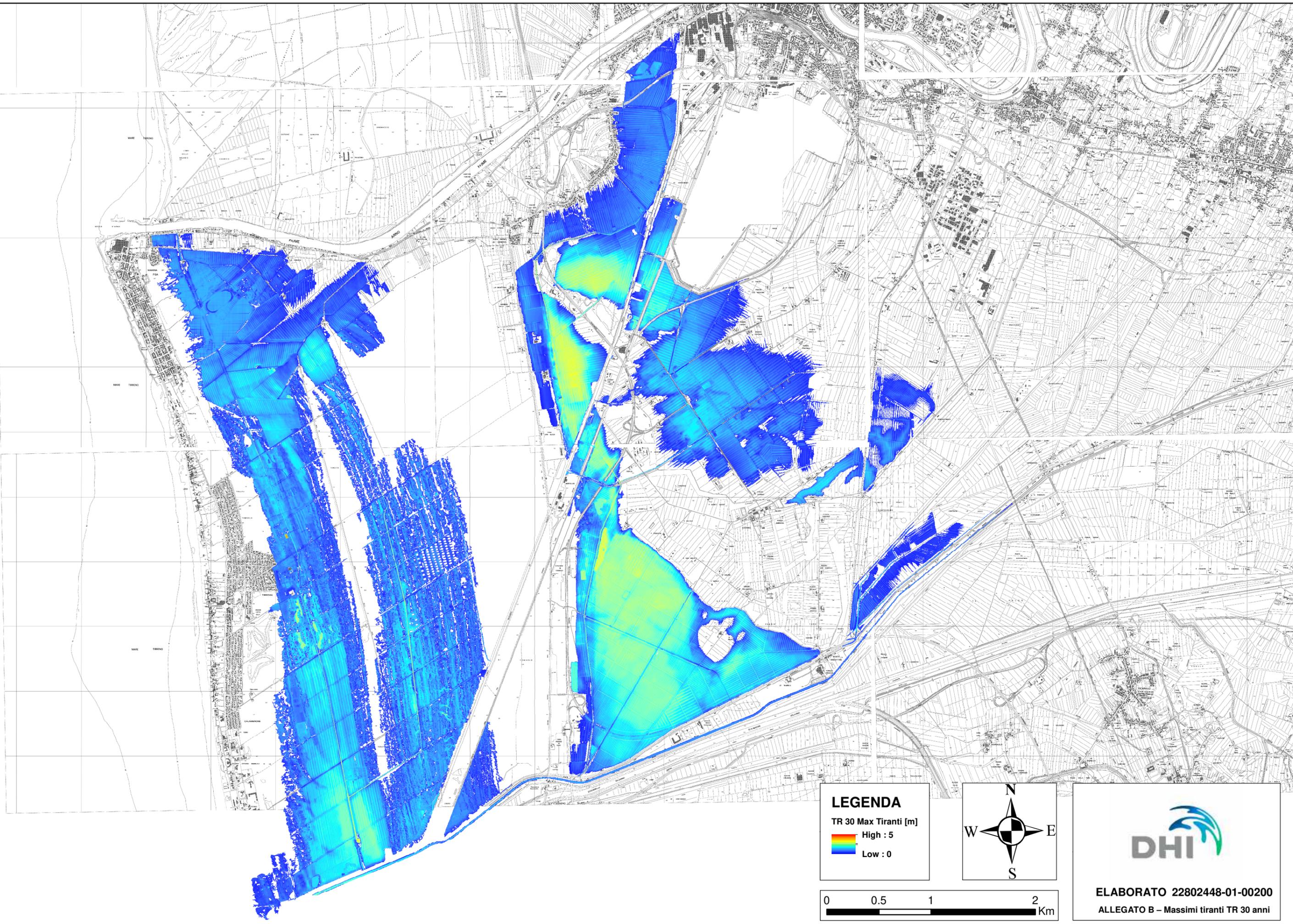
Canale Navicelli – Tempo di Ritorno 200 anni

Canale Navicelli - TR 200 anni						
Progr. (m)	N. Sez.	Q. Fondo (m s.m.)	Y (m)	P.L. (m s.m.)	V (m/s)	H (m s.m.)
0.00	sez1	-2.60	4.08	1.48	0.01	1.48
500.00	sez2	-2.50	3.98	1.48	0.01	1.48
850.00	sez3	-2.48	3.96	1.48	0.01	1.48
1500.00	sez4	-2.50	3.98	1.48	0.01	1.48
2000.00	sez5	-2.58	4.06	1.48	0.07	1.48
2236.00	sez6	-2.48	3.96	1.48	0.14	1.48
2500.00	sez7	-2.64	4.12	1.48	0.18	1.48
3000.00	sez8	-2.66	4.14	1.48	0.24	1.48
3500.00	sez9	-2.68	4.16	1.48	0.22	1.49
4000.00	sez10	-2.74	4.23	1.49	0.20	1.49
4251.00	sez11	-2.75	4.24	1.49	0.21	1.49
4500.00	sez12	-2.76	4.25	1.49	0.22	1.49
5000.00	sez13	-2.78	4.28	1.50	0.19	1.50
5500.00	sez14	-2.80	4.30	1.50	0.18	1.50
6000.00	sez15	-2.82	4.33	1.51	0.23	1.51
6223.00	sez16	-2.83	4.34	1.51	0.22	1.52
6500.00	sez17	-2.84	4.37	1.53	0.29	1.53
7000.00	sez18	-2.86	4.40	1.54	0.38	1.54
7500.00	sez19	-2.88	4.42	1.54	0.35	1.55
8000.00	sez20	-2.90	4.45	1.55	0.34	1.56
8500.00	sez21	-2.95	4.51	1.56	0.35	1.56
9000.00	sez22	-3.00	4.56	1.56	0.33	1.57
9500.00	sez23	-3.05	4.62	1.57	0.33	1.57
10000.00	sez24	-3.10	4.67	1.57	0.32	1.58
10500.00	sez25	-3.15	4.73	1.58	0.31	1.58
11000.00	sez26	-3.18	4.77	1.59	0.31	1.59
11500.00	sez27	-3.20	4.80	1.60	0.30	1.60
12000.00	sez28	-3.23	4.84	1.61	0.31	1.61
12500.00	sez29	-3.25	4.89	1.64	0.30	1.65
12633.00	sez30	-3.30	4.96	1.66	0.27	1.66
13000.00	sez31	-3.33	5.02	1.69	0.19	1.69
13500.00	sez32	-3.36	5.14	1.78	0.23	1.78
14000.00	sez33	-3.36	5.29	1.93	0.30	1.93
14500.00	sez34	-1.75	3.80	2.05	0.28	2.05

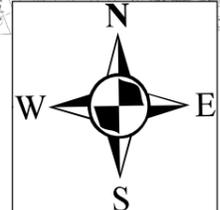
ALLEGATO B

Mappe di tiranti idrici e velocità
di scorrimento nel dominio 2D

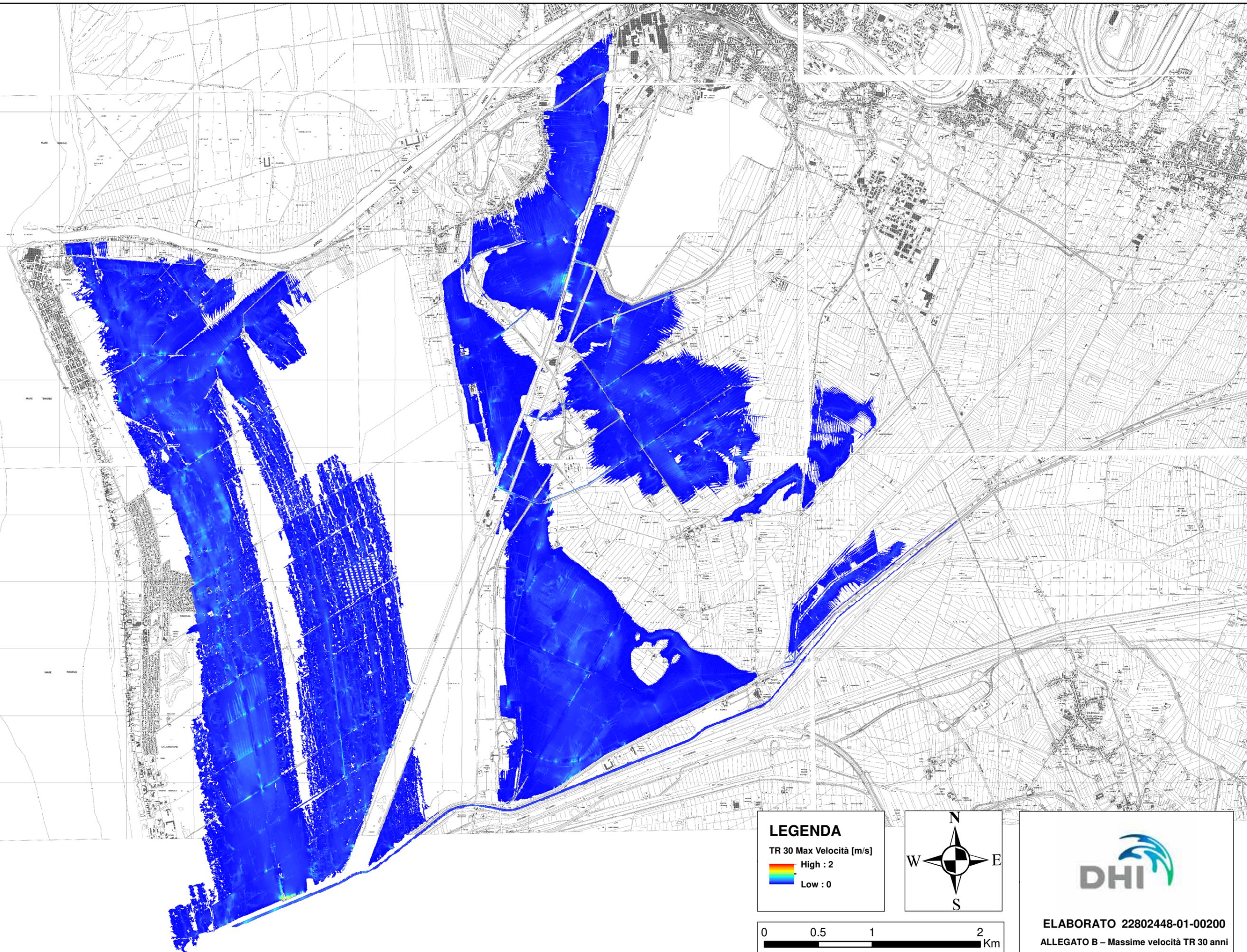




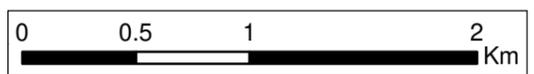
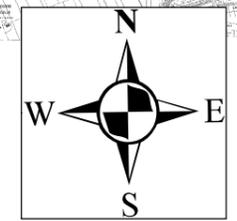
LEGENDA
TR 30 Max Tiranti [m]
High : 5
Low : 0



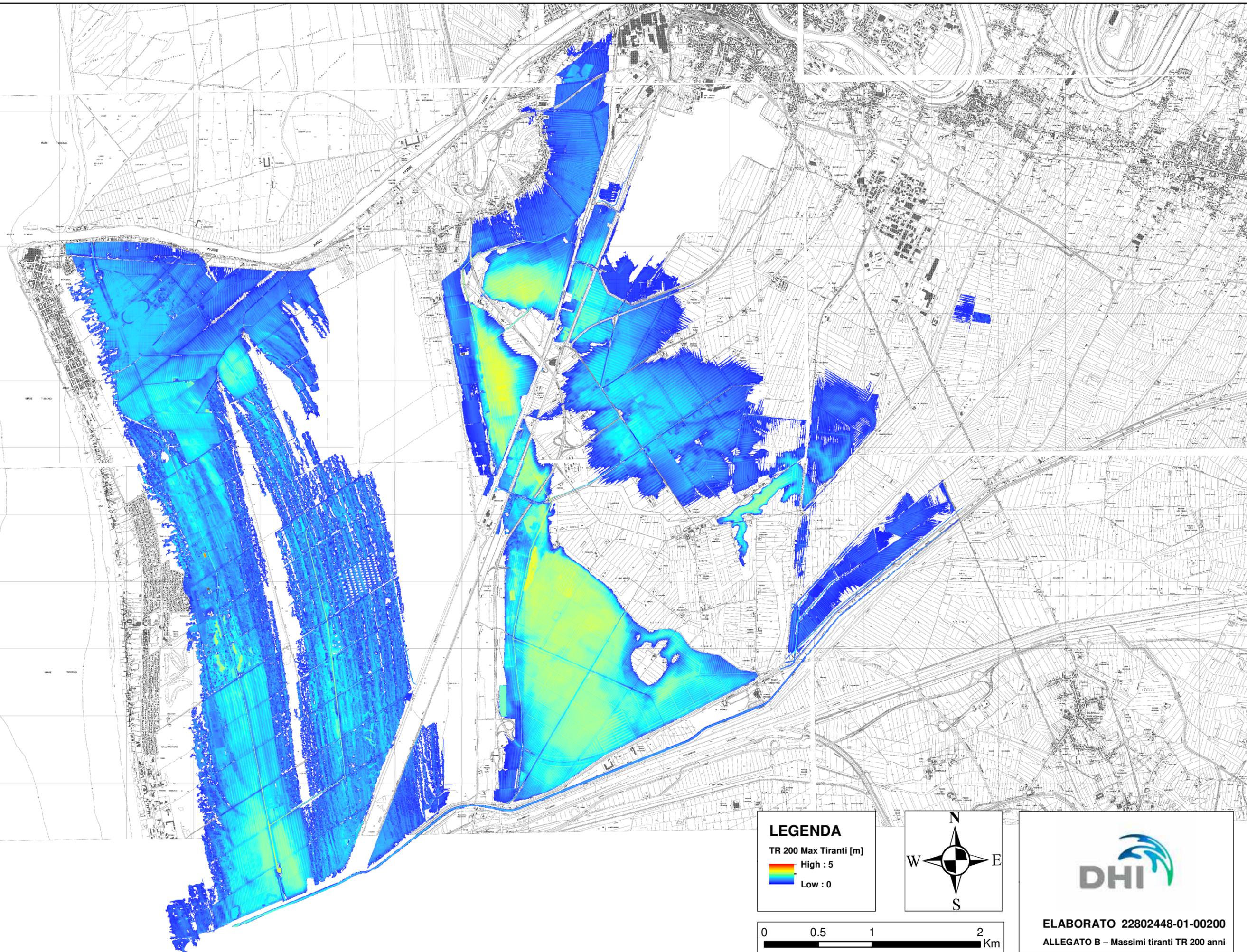
ELABORATO 22802448-01-00200
ALLEGATO B - Massimi tiranti TR 30 anni



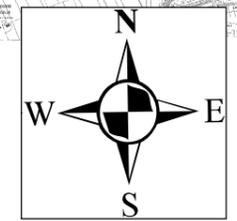
LEGENDA
TR 30 Max Velocità [m/s]
High : 2
Low : 0



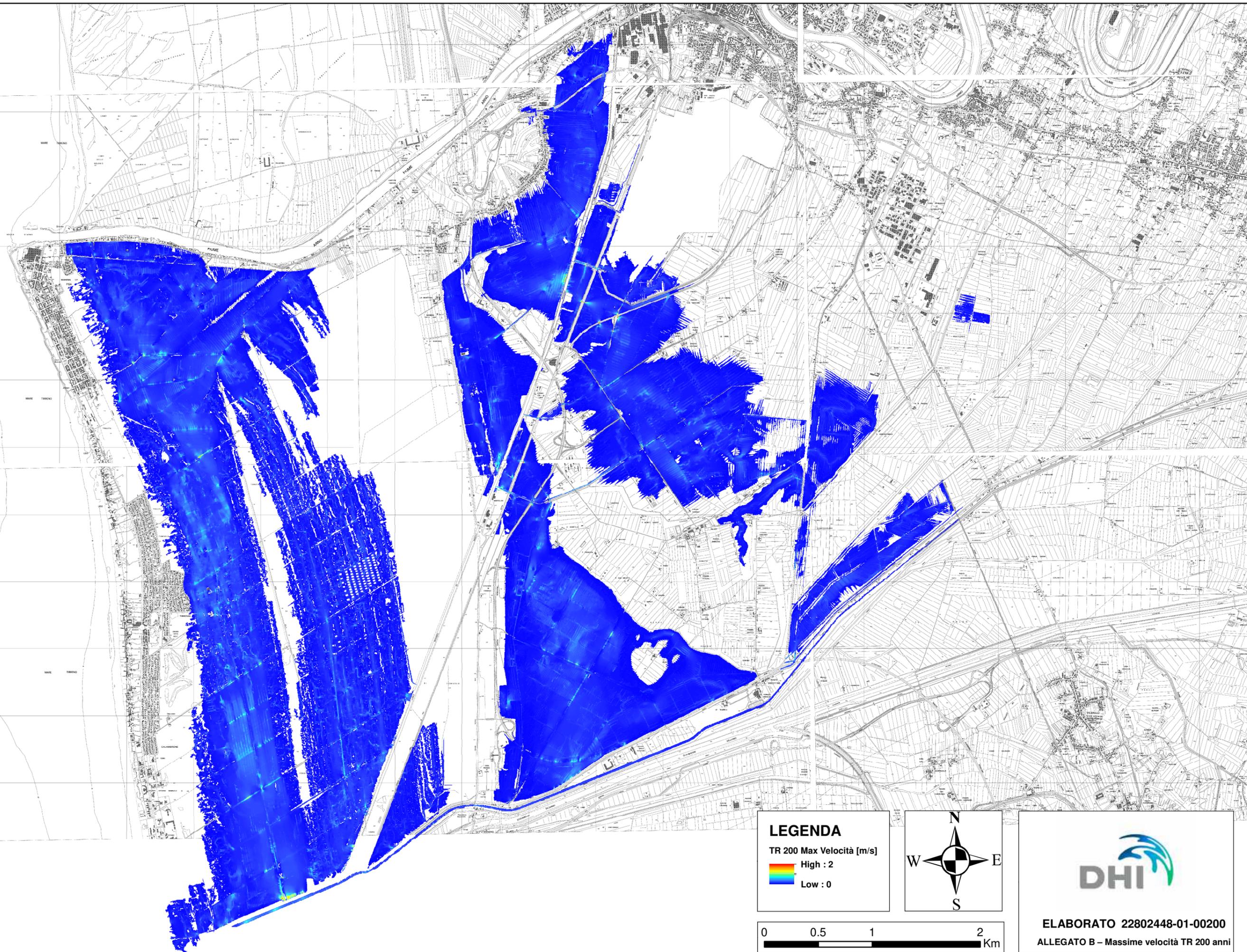
ELABORATO 22802448-01-00200
ALLEGATO B – Massime velocità TR 30 anni



LEGENDA
TR 200 Max Tiranti [m]
High : 5
Low : 0



ELABORATO 22802448-01-00200
ALLEGATO B – Massimi tiranti TR 200 anni



LEGENDA
TR 200 Max Velocità [m/s]
High : 2
Low : 0



ELABORATO 22802448-01-00200
ALLEGATO B – Massime velocità TR 200 anni

ALLEGATO C – MIKE HYDRO RIVER

Descrizione tecnica



PREMESSA

MIKE HYDRO River è un software in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. MIKE HYDRO River, che si presenta come il diretto successore del conosciuto MIKE11, sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire un'ottima rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente GIS).

La grande flessibilità del codice di calcolo permette di integrare, attraverso specifici moduli, le applicazioni idrodinamiche con fenomeni idrologici, trasporto solido, advezione-dispersione, qualità delle acque, ecologia, rendendo MIKE HYDRO River uno strumento indispensabile per affrontare e risolvere molteplici problemi d'ingegneria fluviale quali, ad esempio:

- studi di idraulica fluviale e di propagazione dell'onda di piena;
- studi di idrologia e idrogeologia;
- supporto alla progettazione e gestione di opere idrauliche;
- analisi della rottura dighe;
- analisi del trasporto solido e morfologia fluviale;
- modelli di previsione in tempo reale e di supporto decisionale;
- analisi dei fenomeni di intrusione del cuneo salino in fiumi ed estuari;
- studi di valutazione della qualità delle acque sia superficiali che sotterranee;
- analisi dello stato ecologico dei corsi d'acqua.

MIKE HYDRO River è costituito dai seguenti moduli:

- HD (idrodinamico): simulazione del flusso in canali a pelo libero, costituisce la base per ulteriori moduli aggiuntivi;
- RR (afflussi-deflussi): modulo che consente, partendo dai dati meteorologici (pioggia, temperature, evapotraspirazione, ecc...), su bacini naturali o artificiali, di ricostruire attraverso l'utilizzo di modelli idrologici (NAM, UHM, Drift, ecc...) le portate idriche in assegnate sezioni di calcolo;
- AD (advezione-dispersione): simulazione del processo di advezione e dispersione di una sostanza in soluzione o in sospensione di qualsiasi natura nel corpo idrico, eventualmente caratterizzata da una cinetica di decadimento lineare;
- ECOlab (ecologico): simulazione di una serie di processi qualitativi, tra i quali il ciclo BOD-DO con nitrificazione-denitrificazione, il ciclo del fosforo, l'eutrofizzazione, il trasporto di metalli pesanti ecc.;

- ST (trasporto sedimenti): simulazione del trasporto solido di materiale non coesivo, in modalità disaccoppiata (senza variazione della geometria del fondo alveo) o accoppiata (calcolo delle trasformazioni morfologiche). Questo modulo è attivabile utilizzando l'interfaccia di MIKE11 classic.
- DA (previsioni in tempo reale): il modulo consente, assimilando i dati misurati in tempo reale su un bacino e/o corso d'acqua, di correggere la simulazione idrodinamica al fine di garantire una affidabilità massima sulla previsione di un evento di piena.

Particolarmente efficace risulta la possibilità di poter integrare il codice MIKE HYDRO River, con altri codici di calcolo della famiglia MIKE quali: MIKE 21 (MIKE FLOOD), per simulare in maniera combinata fenomeni 1D e 2D; MIKE SHE, per la modellazione di corpi idrici superficiali e sotterranei; WEST, per simulare in dettaglio i processi nell'impianto di trattamento ed il relativo impatto sul corso d'acqua recettore; MOUSE (MIKE URBAN FLOOD), simula le interferenze tra il corso d'acqua e la rete di drenaggio.

Di seguito si descrive il codice MIKE HYDRO River HD.

MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il "cuore" del codice di calcolo MIKE HYDRO River ed è in grado di simulare il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso quasi - bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e confluenze).

L'adozione del programma di simulazione MIKE HYDRO River consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

- Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.
- Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle e quindi simulare i fenomeni di rigurgito.

- Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati che reti idrauliche con maglie chiuse.

EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE HYDRO River risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- la pendenza del fondo è piccola;
- le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQQ}{C^2AR} = 0$$

dove:

- A = area della sezione bagnata (m²);
- C = coefficiente di attrito di Chezy (m^{1/2} s⁻¹);
- g = accelerazione di gravità (m s⁻²);
- h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);
- Q = portata (m³/s);
- R = raggio idraulico (m);
- α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;
- q = portata laterale addotta (m² s⁻¹).

SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQQ}{C^2AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare, nelle equazioni generali di De Saint Venant, tutti i termini legati alla quantità di moto:

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQQ}{C^2AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine $\frac{\partial h}{\partial x}$. Per ragioni di stabilità questo termine viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. Sono diversi i tipi di strutture che possono essere simulate:

Stramazzo a larga soglia (weir)

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

Tombino (culvert)

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso: il codice calcola in automatico una relazione Q-h che contempla tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

Ponte (bridge)

In MIKE HYDRO River possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito. In particolare sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method). Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

Pompa (pump)

In MIKE HYDRO River una pompa viene descritta specificandone le modalità operative, ossia se lavora a portata costante o seguendo una propria curva caratteristica.

Relazione $Q = A(Zj1) \cdot Zj2$ (control)

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

Struttura mobile (gate)

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE HYDRO River consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{C^2AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{M^2AR^{4/3}}$$

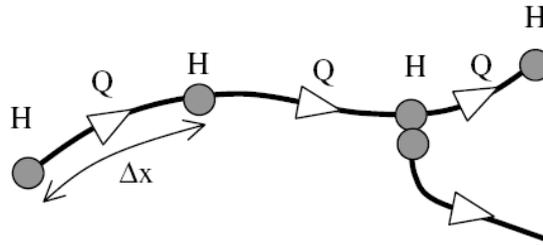
dove M è il coefficiente di Strickler, pari a $1/n$, essendo n il coefficiente di Manning.

CONDIZIONI INIZIALI

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

METODO DI SOLUZIONE

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).



La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE HYDRO River le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

La scelta ottimale dei passi di calcolo Dx (spazio) e Dt (tempo) da utilizzare nell'ambito di una simulazione è molto importante perché questi parametri possono condizionare pesantemente la stabilità del calcolo numerico e quindi i risultati stessi della simulazione.

Esistono due differenti criteri per determinare correttamente i passi di calcolo Dx e Dt. Essi sono descritti nel seguito.

1) Criterio di Courant

$$Cr = \frac{\sqrt{g \cdot d + V}}{Dx} \cdot Dt$$

dove:

- Cr = numero di Courant;
- d = altezza d'acqua media;
- V = velocità media della corrente;
- g = accelerazione di gravità;

Dt, Dx = passi di calcolo.

Il numero di Courant esprime quanti Dx vengono percorsi da un'onda, causata da una piccola perturbazione, che si muove in un intervallo di tempo Dt unitario.

Per correnti lente ($Fr < 1$), il valore massimo del numero di Courant deve essere inferiore a 20.

2) Criterio della velocità.

Il criterio della velocità stabilisce che i passi Dx e Dt di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio Dx in un tempo maggiore di Dt , e cioè:

$$V *Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente.

In definitiva entrambi i criteri esprimono il concetto che, per un dato passo di tempo Dt , Dx deve essere maggiore di un valore definito; contemporaneamente sia Dt che Dx devono essere inferiori a valori prestabiliti, in modo da descrivere correttamente il fenomeno in esame.

Il modello MIKE HYDRO River genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di Dx , vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro Dx o meno.



ALLEGATO D – MIKE 21 HD

Descrizione tecnica



PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore. I principali campi di applicazione sono:

- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi;
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- CLASSIC GRID (Griglia classica singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- MULTIPLE GRID (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- FLEXIBLE MESH (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- CURVILINEAR (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.

In campo fluviale MIKE 21 può essere utilizzato in modo integrato con altri codici di calcolo del DHI, in particolare:

- MIKE 11, grazie al modulo MIKE FLOOD, che consente di condurre simulazioni idrodinamiche accoppiando gli approcci 1d e 2d in modo totalmente integrato;
- MIKE URBAN CS per la simulazione di allagamenti in ambito urbano dalla rete di drenaggio.

In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

Di seguito si descrive il modulo MIKE 21 HD Classical Grid.

Modulo Idrodinamico (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

Come menzionato in precedenza, i risultati di una simulazione MIKE 21 HD possono essere usati come input per la simulazione di fenomeni fisici strettamente dipendenti dagli aspetti idrodinamici:

- trasporto di sostanze disciolte/sospese in acqua, modulo AD e modulo "Mud Transport";
- trasporto solido di materiale non coesivo, modulo ST;
- qualità delle acque ed idroecologia, modulo ECO Lab.

Infine, per quanto riguarda le analisi dei fenomeni di esondazione, MIKE 21 può essere accoppiato in modo dinamico attraverso l'interfaccia MIKE FLOOD al codice monodimensionale MIKE 11, per la simulazione degli alvei e dei canali, ed al codice MIKE URBAN, per la simulazione delle reti di drenaggio e collettamento urbano, schematizzando il dominio di calcolo in modo integrato 1D/2D.

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema delle equazioni di De St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$ = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$ = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$ = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$ = coefficiente di scabrezza di Chezy;

G = accelerazione di gravità;

$f(V)$ = fattore d'attrito del vento;

$V,V_x,V_y(x,y,t)$ = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$ = parametro di Coriolis;

$p_a(x,y,t)$ = pressione atmosferica;

ρ_w = densità dell'acqua;

x,y = coordinate spaziali;

t = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} = componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y. La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hE \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

Le due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} hE \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

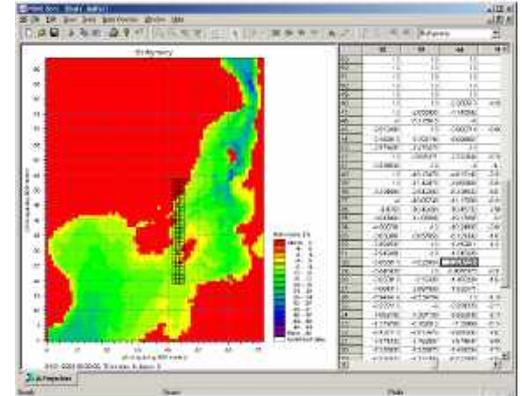
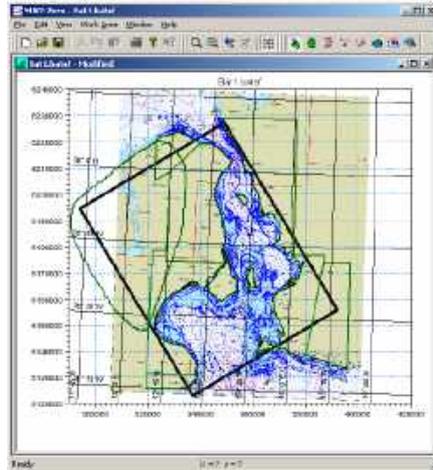
La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria (m³/s/m) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m³/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" la situazione ottenuta è di effettiva stazionarietà.

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni piano-altimetriche della batimetria.

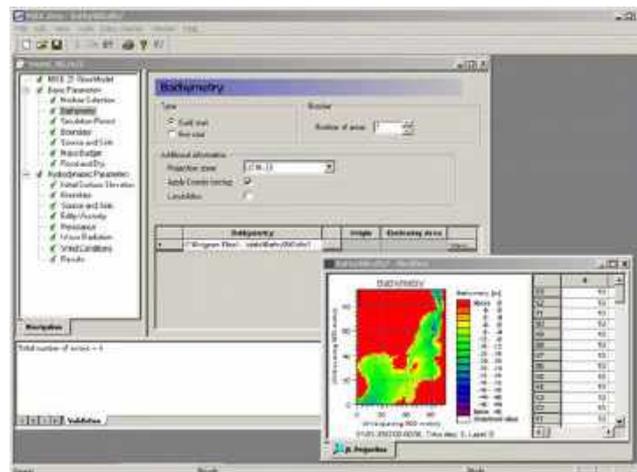
Il medesimo approccio della griglia singola viene utilizzato anche nella versione "griglia multipl-nested grid", che permette di innestare nel dominio di calcolo griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio.

Le equazioni della conservazione della massa e della quantità di moto sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).



Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).



I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio

per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

