

COMUNE DI MASSA
Provincia di Massa Carrara



STUDIO DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA
NEL COMUNE DI MASSA

ELABORATO:

R.01

OGGETTO:

RELAZIONE
IDROLOGICA E IDRAULICA

SCALA

-



Via Bonifacio Lupi, 1
50129 - FIRENZE
Tel. 055 484206 / 055 491896
Fax. 055 4626342
Email. segreteria.firenze@physis.net
Pec. segreteria.physis@pec.it

PROGETTISTA:

Dott. Ing. David Settesoldi

COLLABORATORI TECNICI:

Ing. Michele Catella
Ing. Martina Alderighi
Geol. Silvia Angelini
Geom. Daniele Natali

COMMITTENTE:

COMUNE DI MASSA
Via Cavour, 23
54100 - Massa (MS)

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
02					
01	SECONDA EMISSIONE	21/11/2014	Ing. Martina Alderighi	Ing. Michele Catella	Ing. David Settesoldi
00	PRIMA EMISSIONE	30/04/2014	Ing. Martina Alderighi	Ing. Michele Catella	Ing. David Settesoldi

REVISIONE	DATA
01	21/11/2014

UNI EN ISO 9001:2008
Sistema di Gestione per la Qualità
Certificato N. SQ 12739



COMUNE DI MASSA
PROVINCIA DI MASSA CARRARA

STUDIO DELLA PERICOLOSITA' IDRAULICA NEL COMUNE DI MASSA

RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA

Physis – Ingegneria per l'Ambiente

Firenze, Novembre 2014

ELENCO ELABORATI

ELENCO ELABORATI:*Elaborati tecnici*

R01	—	Relazione idrologica e idraulica
A01	—	Tabulati analisi idrologiche
A02	—	Tabulati verifiche idrauliche
A03	—	Sezioni fluviali e livelli idrometrici

Elaborati grafici

T01.1	—	Bacini idrografici
T01.2	—	Parametri Modello Idrologico [1:60.000]
T02.1	—	Planimetria caratteristiche modello idraulico (DTM) [1:10.000]
T02.2	—	Planimetria caratteristiche modello idraulico (Sezioni) [1:10.000]
T02.3	—	Planimetria caratteristiche modello idraulico (Sezioni) [1:10.000]
T02.4	—	Planimetria caratteristiche modello idraulico (Sezioni) [1:10.000]
T03.1	—	Profili longitudinali per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni nello stato attuale, per fosso Brugiano, di Mezzo, Silcia, Lodolina, Connettore, Tornabuoni, Dalmine, Becaro, Nuovo e fosso Lavello [varie]
T03.2	—	Profili longitudinali per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni nello stato attuale per Torrente Ricortola e Fossi Castagnara, San Lorenzo e Pernice [varie]
T03.3	—	Profili longitudinali per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni nello stato attuale per fiume Frigido, e fossi Castellazzo, Ruotino, Bocchetta, Fossa Grande [varie]
T03.4	—	Profili longitudinali per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni nello stato attuale per Fossi Magliano, Colletto, San Remigio, Loghi, Ronco, Riva Dei Ronchi e Canale delle Grondini [varie]
T03.5	—	Profili longitudinali per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni nello stato attuale per torrente Canalmagro, Fosso del Sale, canale degli Sforza e fosso Poveromo [varie]
T04.01	—	Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni nello stato attuale per fosso Lavello [1:10.000]
T04.02	—	Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni nello stato attuale per torrente Ricortola e fossi Castagnara, San Lorenzo e Pernice [1:10.000]
T04.03	—	Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni nello stato attuale per fossi Brugiano, di Mezzo, Silcia, Lodolina, Connettore, Tornabuoni, Dalmine, Becaro e Nuovo [1:10.000]
T04.04.1	—	Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 20 anni nello stato attuale per fiume Frigido, e fossi Castellazzo, Ruotino, Bocchetta, Fossa Grande [1:10.000]
T04.04.2	—	Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 30 anni nello stato attuale per fiume Frigido, e fossi Castellazzo, Ruotino, Bocchetta, Fossa Grande [1:10.000]
T04.04.3	—	Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 200 anni nello stato attuale per fiume Frigido, e fossi Castellazzo, Ruotino, Bocchetta, Fossa Grande [1:10.000]
T04.04.4	—	Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 500 anni nello stato attuale per fiume Frigido, e fossi Castellazzo, Ruotino, Bocchetta, Fossa Grande [1:10.000]
T04.05	—	Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni nello stato attuale per i fossi Magliano, Colletto, San Remigio, Loghi, Ronco, Riva Dei Ronchi e Canale delle Grondini [1:10.000]
T04.06	—	Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni nello stato attuale per fosso Poveromo [1:10.000]
T04.07	—	Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni nello

- stato attuale per torrente Canalmagro, fosso del Sale e canale degli Sforza [1:10.000]
- T04.08 — Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni nell'ipotesi di rottura arginale nello stato attuale per torrente Ricortola e fossi Castagnara, San Lorenzo e Pernice [1:10.000]
- T04.09.1 — Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 30 anni nell'ipotesi di rottura arginale in sponda destra nello stato attuale per fiume Frigido, e fossi Castellazzo, Ruotino, Bocchetta, Fossa Grande [1:10.000]
- T04.09.2 — Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 200 anni nell'ipotesi di rottura arginale in sponda destra nello stato attuale per fiume Frigido, e fossi Castellazzo, Ruotino, Bocchetta, Fossa Grande [1:10.000]
- T04.09.3 — Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 30 anni nell'ipotesi di rottura arginale in sponda sinistra nello stato attuale per fiume Frigido, e fossi Castellazzo, Ruotino, Bocchetta, Fossa Grande [1:10.000]
- T04.09.4 — Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 200 anni nell'ipotesi di rottura arginale in sponda sinistra nello stato attuale per fiume Frigido, e fossi Castellazzo, Ruotino, Bocchetta, Fossa Grande [1:10.000]
- T04.10 — Battenti di esondazione e velocità di propagazione per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni nell'ipotesi di rottura arginale nello stato attuale per torrente Canalmagro, fosso del Sale e canale degli Sforza [1:10.000]
- T05.1 — Battenti di esondazione per il tempo di ritorno di 20 anni nello stato attuale [1:10.000]
- T05.2 — Battenti di esondazione per il tempo di ritorno di 30 anni nello stato attuale [1:10.000]
- T05.3 — Battenti di esondazione per il tempo di ritorno di 200 anni nello stato attuale [1:10.000]
- T05.4 — Battenti di esondazione per il tempo di ritorno di 500 anni nello stato attuale [1:10.000]
- T05.5 — Battenti di esondazione nell'ipotesi di rottura arginale per il tempo di ritorno di 30 anni nello stato attuale [1:10.000]
- T05.6 — Battenti di esondazione nell'ipotesi di rottura arginale per il tempo di ritorno di 200 anni nello stato attuale [1:10.000]
- T06.1 — Planimetria delle aree inondabili [1:10.000]
- T06.2 — Planimetria delle aree inondabili nell'ipotesi di rottura arginale [1:10.000]
- T07 — Planimetria della pericolosità idraulica ai sensi del regolamento 53/R [1:10.000]
- T08 — Planimetria della pericolosità idraulica ai sensi del PAI [1:10.000]

INDICE

1. PREMESSA.....	7
2. IL QUADRO CONOSCITIVO	10
2.1. GLI STUDI DI DETTAGLIO E ALTRA DOCUMENTAZIONE.....	10
2.2. I TRATTI OGGETTO DI STUDIO E LE SEZIONI FLUVIALI.....	10
2.3. ACQUISIZIONE DEI DATI TERRITORIALI.....	12
3. ANALISI IDROLOGICA	13
3.1. LE CURVE DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA.....	13
3.2. I DATI TERRITORIALI.....	14
3.3. IL MODELLO IDROLOGICO A PARAMETRI DISTRIBUITI.....	20
3.4. LE PRECIPITAZIONI.....	21
3.5. I PARAMETRI DEL MODELLO AFFLUSSI – DEFLUSSI.....	21
3.6. LE PORTATE DI PIENA.....	23
3.7. CONFRONTO CON GLI STUDI PRECEDENTI.....	24
4. ANALISI IDRAULICA.....	25
4.1. IL MODELLO DIGITALE DELLE AREE INONDABILI	25
4.2. I PARAMETRI DEL MODELLO IDRAULICO	25
4.3. GLI ELEMENTI DEL MODELLO IDRAULICO	27
4.4. GLI SCENARI DI VERIFICA.....	29
4.5. I RISULTATI DELLA VERIFICA.....	30
5. DELIMITAZIONE DELLE AREE INONDABILI E DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA.....	31
5.1. LE AREE INONDABILI	31
5.2. LA PERICOLOSITÀ IDRAULICA DEL 53/R.....	31
5.3. LA PERICOLOSITÀ IDRAULICA DEL PAI.....	32
6. OSSERVAZIONI CONFERENZA DI SERVIZI	33
6.1. PORTATE DI PIENA.....	34
6.2. SOVRALLUVIONAMENTO.....	34
6.3. ATTENUAZIONE DELLE PORTATE	35
6.4. ROTTURE ARGINALI.....	36
6.5. CARTA PERICOLOSITÀ IDRAULICA.....	37

Appendice A – Il modello idrologico

Appendice B – Il modello idraulico

ELENCO TABELLE

Tabella 3-1 – Legenda della cartografia geo-litologica.	14
Tabella 3-2 – Legenda della cartografia dell'uso del suolo.....	15
Tabella 3-3 – Capacità di ritenuta per ciascuna classe geo-litologica.	19
Tabella 3-4 – Capacità di ritenuta aggiuntiva per ciascuna classe di uso del suolo.	19
Tabella 3-5 – Velocità di infiltrazione a saturazione per ciascuna classe geo-litologica.	20
Tabella 3-6 – Moltiplicatore della velocità di infiltrazione a saturazione.....	20
Tabella 3-7 – Parametri per il calcolo dei contributi unitari in mc/s kmq.	22
<i>Tabella 3-8 – Parametri del modello idrologico utilizzati per i vari bacini.</i>	<i>23</i>
<i>Tabella 3-9 – Confronto portate studio P.S. e studio R.U.</i>	<i>24</i>
<i>Tabella 4-1 - Scabrezze modello idraulico</i>	<i>26</i>
<i>Tabella 4-2 – Caratteristiche geometriche delle casse di espansione presenti sul t. Canalmagro.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabella 4-3 – Caratteristiche geometriche delle casse di espansione presenti sul t. Canalmagro.....</i>	<i>28</i>
Tabella 4-4 – Livelli del mare.	28
<i>Tabella 4-5– Impianti idrovori presenti nel sistema.....</i>	<i>29</i>
Tabella 5-1 – Superficie inondata nello stato attuale.....	31
Tabella 5-2 – Superficie inondata nell'ipotesi di rottura arginale nello stato attuale.....	31
Tabella 5-3 – Superficie a diversa pericolosità ai sensi del D.P.G.R. 53/R nello stato attuale.....	32
Tabella 5-4 – Superficie a diversa pericolosità ai sensi del PAI nello stato attuale	32
<i>Tabella 6-1 - Parametri di scabrezza.....</i>	<i>35</i>

ELENCO FIGURE

Figura 3-1 - Modello digitale del terreno	16
Figura 3-2 - Uso del suolo	17
Figura 3-3 - Geolitologia	18

1. PREMESSA

La società Physis s.r.l. è stata incaricata con determinazione n. 1772 del 07/05/2012 di redigere uno studio di approfondimento della pericolosità idraulica nel comune di Massa a supporto sia delle attività del Servizio di Protezione Civile e Salvaguardia Idrogeologica che del Regolamento Urbanistico redatto a cura del Settore Pianificazione Territoriale del comune di Massa.

Per il territorio del comune di Massa era stato redatto dal Prof. Ing. Enio Paris nel marzo del 2007 uno studio idrologico ed idraulico dei principali corsi d'acqua ricadenti nel territorio comunale.

Tale studio era stato oggetto di una revisione e integrazione a cura della società Physis s.r.l. nel giugno 2009 conclusasi a seguito delle osservazioni della Autorità di Bacino Toscana Nord nel maggio 2010 con la redazione delle carte a supporto del Piano Strutturale.

Il presente studio costituisce un approfondimento di quello redatto a supporto del Piano Strutturale.

L'incarico del 07/05/2012 prevedeva lo studio dei seguenti corsi d'acqua:

- Fosso Lavello;
- Torrente Ricortola;
- Fosso Brugiano;
- Torrente Frigido;
- Fosso Magliano;
- Torrente Poveromo;
- Canale delle Grondini e Fosso dei Loghi;
- Torrente Canalmagro;
- Fosso del Sale e Canale degli Sforza;

Era prevista l'implementazione di un modello bidimensionale di passo 25mx25m ricavato dai rilievi Lidar. Era inoltre prevista la definizione e la verifica degli interventi di messa in sicurezza per i suddetti corsi d'acqua.

Successivamente come concordato nella riunione del 03/12/2013 presso il comune di Massa tale incarico è stato rimodulato. In particolare sono stati inseriti nello studio i seguenti corsi d'acqua:

- Fosso della Pernice;
- Fosso San Lorenzo;
- Fosso Castagnara;
- Fosso Grande;
- Fiume Frigido a monte della via Catagnina;
- Fosso Ruotino;
- Fosso Castellazzo;
- Fosso Bocchetta;
- Canale delle Grondini a monte della ferrovia;
- Fosso San Remigio;
- Torrente Canalmagro a monte della ferrovia;
- Fosso affluente in sinistra del Magliano che attraversa Riva dei Ronchi,
- Fosso affluente in sinistra del Magliano a nord di Via Mignani.

Inoltre è stato deciso di implementare il modello bidimensionale con passo 10mx10m. In ragione della maggiore complessità del modello idraulico dello stato attuale è stata stralciata la definizione e la verifica degli interventi di messa in sicurezza.

Lo studio è stato condotto tenendo conto di quanto previsto dai "*Criteri per lo sviluppo degli studi ai fini della valutazione di proposte di modifica delle aree a pericolosità idraulica molto elevata e elevata*"

della Autorità di Bacino di Rilievo Regionale Toscana Nord in riferimento alle specifiche caratteristiche del sistema analizzato.

Nel mese di aprile 2014 è stato consegnato una prima stesura dello studio condotto con le portate utilizzate a supporto degli studi per il Piano Strutturale ed è stata convocata una conferenza di servizi ai sensi dell'art. 13 del D.P.G.R. Regione Toscana 25 Ottobre 2011 n. 53/R in data 13 giugno 2014.

Nell'ambito della conferenza di servizi sono emerse una serie di osservazioni allo studio che di seguito si riassumono:

- la opportunità di utilizzare nello studio le portate idrologiche derivanti dallo studio affidato dalla Regione Toscana alla Università degli Studi di Firenze e in corso di redazione;
- la necessità di supportare le considerazioni effettuate in merito alle problematiche del sovralluvionamento;
- la necessità di supportare la scelta effettuata relativamente alla sottrazione di portata per effetto delle esondazioni;
- la necessità di affrontare il tema delle possibili rotture arginali;
- la necessità di tenere conto della presenza degli edifici e di mantenerli nel loro complesso in una unica classe di pericolosità.

Lo studio, in ottemperanza a quanto emerso in sede di conferenza di servizi, risulta articolato nelle seguenti fasi fondamentali:

FASE 1 - definizione del quadro conoscitivo: in tale fase sono stati acquisiti e esaminati gli studi, la documentazione e i dati disponibili riguardanti i corsi d'acqua considerati. In particolare è stato acquisito lo studio redatto dal Prof. Ing. Enio Paris nel marzo del 2007, lo studio redatto dagli scriventi per il comune di Montignoso nel Luglio 2008 e lo studio redatto a supporto del Piano Strutturale. Sono state inoltre acquisite le elaborazioni condotte a cura della Regione Toscana in merito alla pluviometria dell'area, e in particolare lo studio per la determinazione delle nuove curve di possibilità pluviometrica, e in merito alla valutazione dei contributi di piena dei corsi d'acqua dal Parmignola al Versilia.

FASE 2 – analisi idrologica: l'analisi idrologica è stata condotta con il modello idrologico implementato per gli studi a supporto del P.S. del comune di Massa utilizzando le curve di possibilità pluviometrica recentemente aggiornate a cura della Regione Toscana e calibrando i parametri in modo da avere contributi di piena analoghi a quelli stimati sempre dalla Regione Toscana nell'ambito della convenzione con l'Università di Firenze a seguito degli eventi del 2012. Con l'analisi idrologica sono stati valutati gli idrogrammi di piena per i bacini oggetto di studio per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni.

FASE 3 – analisi idraulica: il fenomeno della propagazione degli eventi di piena lungo i corsi d'acqua considerati è stato simulato attraverso un modello unidimensionale in moto vario accoppiato ad un modello bidimensionale che ha permesso di individuare, nella situazione attuale, i livelli idrici nelle sezioni fluviali considerate nonché i livelli di inondazione che, per i vari tempi di ritorno, interesseranno le aree adiacenti opportunamente schematizzate sulla base di un modello digitale del terreno con passo 10mx10m ricavato dai dati Lidar.

L'analisi idraulica è stata condotta, per quanto riguarda le acque alte, sia considerando che le arginature siano sormontabili senza collasso che nella ipotesi di collasso a seguito del sormonto.

FASE 4 – delimitazione delle aree inondabili: sulla base dei risultati ottenuti nella Fase 3 sono stati individuati i tratti critici dei corsi d'acqua considerati in relazione alla insufficienza di contenimento delle portate di piena nelle diverse sezioni fluviali disponibili. Sulla base delle mappe dei battenti di esondazione sono state inoltre perimetrate le aree allagabili per i tempi di ritorno 20, 30, 200 e 500

anni in assenza di rotture arginali e per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni per rotture arginali sulle acque alte.

FASE 5 – perimetrazione della pericolosità idraulica: per i vari tempi di ritorno sono state mappate le fasce di pericolosità idraulica ai sensi del regolamento 53/R e ai sensi del PAI. Nella definizione della pericolosità idraulica si è tenuto conto delle diverse modalità di esondazione per sormonto senza rottura o per sormonto con rottura.

Di seguito si illustrano i criteri e le attività svolte per le singole fasi sopra descritte.

2. II QUADRO CONOSCITIVO

2.1. Gli studi di dettaglio e altra documentazione

Per la redazione del presente studio sono stati utilizzati i dati ed i risultati dei seguenti studi:

- [1] - COMUNE DI MASSA, "Studio idrologico e idraulico dei principali corsi d'acqua e redazione della carta di pericolosità idraulica del territorio del Comune di Massa", marzo 2007.
- [2] - COMUNE DI MONTIGNOSO, "Verifica delle condizioni di rischio idraulico dell'area adiacente al tratto terminale del Fosso del Sale e definizione degli interventi di messa in sicurezza" - luglio 2008.
- [3] - COMUNE DI MASSA, Opere di risanamento idrogeologico dell'area compresa tra la linea di costa, il tracciato ferroviario Ge-Pi, il torrente Ricortola e il fiume Frigido, progetto definitivo, dicembre 2008;
- [4] - COMUNE DI MASSA, Studio idrologico e idraulico per la revisione della pericolosità idraulica dei principali corsi d'acqua nel comune di Massa - maggio 2010.
- [5] - REGIONE TOSCANA - Attività di ricerca per la mitigazione del rischio idraulico nella Regione Toscana - Macroattività b - modellazione idrologica - Attività b1: regionalizzazione precipitazioni;
- [6] - REGIONE TOSCANA - Attività di ricerca per la mitigazione del rischio idraulico nella Regione Toscana - calcolo delle portate di piena per assegnati tempi di ritorno con il modello MOBIDIC.

2.2. I tratti oggetto di studio e le sezioni fluviali

I tratti oggetto di studio per i corsi d'acqua considerati sono i seguenti:

- Fosso Lavello, per un tratto di circa 2.8km a monte della foce;
- Torrente Ricortola, tratto compreso tra la località Mirteto e la foce, per una lunghezza complessiva di circa 5.9 km;
- Fosso Castagnara, tratto compreso tra la località Scortarola e la confluenza nel Ricortola, per una lunghezza complessiva di circa 1.4 km;
- Fosso San Lorenzo, per un tratto di circa 0.23 km a monte della confluenza nel fosso della Pernice;
- Fosso della Pernice, per un tratto di circa 0.9 km a monte della confluenza nel torrente Ricortola;
- Fosso Brugiano, tratto da monte di via Gorizia fino alla foce, per una lunghezza complessiva di circa 1.8 km, compresa inoltre la rete di acque basse ad esso afferente, sottesa dall'autostrada Genova-Rosignano.
- Torrente Frigido, tratto compreso tra la confluenza del Castellazzo e la foce, per una lunghezza complessiva di circa 6.85 km;
- Fosso Castellazzo, tratto compreso tra la località Capaccola e la confluenza nel torrente Frigido per una lunghezza complessiva di circa 0.82 km;
- Fosso Ruotino, per un tratto di circa 0.26 km a monte della confluenza nel torrente Frigido;
- Fosso Bocchetta, dalla località Volpignano alla confluenza nel torrente Frigido per un tratto di circa 1.26 km;
- Fossa Grande, dalla località Castellaro alla confluenza nel torrente Frigido per un tratto di circa 1.83 km;
- Fosso Magliano, tratto compreso tra il ponte della ferrovia Pisa-Genova e la foce, per una lunghezza complessiva di circa 3.1 km;
- Canale delle Grondini, tratto compreso tra la località La Rocca e il ponte della ferrovia Genova - Pisa per un tratto di circa 1.57km;
- Fosso Colletto, per un tratto di circa 0.53km a monte della confluenza nel Canale delle Grondini;
- Fosso San Remigio, a monte della confluenza nel fosso delle Grondini per un tratto di circa 1.1km;

- Canale delle Grondini, tratto compreso tra il ponte della ferrovia Genova – Pisa e la confluenza nel Fosso dei Loghi, per una lunghezza complessiva di 1.8 km;
- Fosso dei Loghi, tratto dalla confluenza con il canale delle Grondini e la confluenza con il fosso Magliano, per una lunghezza complessiva di circa 0.6 km;
- Fosso Ronco, tratto a monte della confluenza con il fosso Magliano per circa 0.6 km;
- Fosso Riva dei Ronchi, tratto a monte della confluenza con il fosso Magliano per circa 0.6 km;
- Torrente Poveromo, tratto compreso tra l'Autostrada Genova-Rosignano e la foce, per una lunghezza complessiva di circa 2.1 km;
- Torrente Canalmagro, tratto compreso tra la località Ferriere e la confluenza nel canale di collegamento al Canale degli Sforza, per una lunghezza complessiva di circa 5.0 km;
- Fosso del Sale, tratto da Via del Fossetto alla confluenza con canale degli Sforza, per una lunghezza complessiva di circa 1.7 km;
- Canale degli Sforza, tratto compreso dalla confluenza con il fosso del Sale fino alla confluenza con il fiume Versilia, per una lunghezza complessiva di circa 0.5 km.

Le sezioni trasversali estese fino al massimo contenimento spondale e/o arginale sono così ripartite:

- per il Fosso Lavello, nel tratto considerato sono disponibili 41 sezioni;
- per il Torrente Ricortola, nel tratto considerato sono disponibili 230 sezioni;
- per il Fosso Castagnara, nel tratto considerato sono disponibili 83 sezioni;
- per il Fosso San Lorenzo, nel tratto considerato sono disponibili 29 sezioni;
- per il Fosso della Pernice, nel tratto considerato sono disponibili 43 sezioni;
- per il Fosso Brugiano, e per la rete afferente di acque basse, nel tratto considerato sono disponibili 322 sezioni (Brugiano 49, Becaro 20, Silcia 64, Dalmine 49, Lodolina 14, Connettore 17, Di Mezzo 60, Tornabuoni 13, Fosso Nuovo 36);
- per il Torrente Frigido, nel tratto considerato sono disponibili 143 sezioni;
- per il Fosso Castellazzo, nel tratto considerato sono disponibili 113 sezioni;
- per il Fosso Ruotino, nel tratto considerato sono disponibili 60 sezioni;
- per il Fosso Bocchetta, nel tratto considerato sono disponibili 126 sezioni;
- per la Fossa Grande, nel tratto considerato sono disponibili 109 sezioni;
- per il Fosso Magliano, nel tratto considerato, sono disponibili 65 sezioni;
- per il Canale delle Grondini, nel tratto considerato, sono disponibili 178 sezioni;
- per il Fosso Colletto, nel tratto considerato, sono disponibili 67 sezioni;
- per il Fosso San Remigio, nel tratto considerato, sono disponibili 47 sezioni;
- per il Fosso dei Loghi, nel tratto considerato, sono disponibili 32 sezioni;
- per il Fosso Ronco, nel tratto considerato, sono disponibili 55 sezioni;
- per il Fosso Riva dei Ronchi, nel tratto considerato, sono disponibili 27 sezioni;
- per il Fosso Poveromo, nel tratto considerato, sono disponibili 67 sezioni;
- per il Torrente Canalmagro, nel tratto considerato sono disponibili 227 sezioni;
- per il Fosso del Sale, nel tratto considerato sono disponibili 31 sezioni;
- per il Canale degli Sforza, nel tratto considerato sono disponibili 16 sezioni.

Per il fosso Lavello è stato condotto un rilievo specifico per il presente studio e sono state utilizzate anche le sezioni utilizzate in un analogo studio condotto per la Autorità Portuale di Carrara.

I rilievi dei canali:

- Fosso della Pernice;
- Fosso San Lorenzo;
- Fosso Castagnara;
- Fosso Grande;
- Fiume Frigido a monte della via Catagnina;
- Fosso Ruotino;
- Fosso Castellazzo;

- Fosso Bocchetta;
- Canale delle Grondini a monte della ferrovia;
- Fosso Colletto;
- Fosso San Remigio;
- Torrente Canalmagro a monte della ferrovia;
- Fosso affluente in sinistra del Magliano che attraversa Riva dei Ronchi;

sono stati forniti dal Comune di Massa.

Le altre sezioni sono state acquisite dallo studio [4] condotto a supporto del Piano Strutturale. Le sezioni del torrente Frigido sono state verificate con i dati Lidar per quanto riguarda la parte interna alle arginature.

Inoltre, la rete di acque basse del bacino del fosso del Brugiano è stata acquisita dal progetto definitivo [3] dal quale sono state ricavate le sezioni per la verifica.

L'ubicazione definitiva delle sezioni topografiche acquisite nell'ambito del presente studio è riportata nelle Tavole T02.2, T02.3 e T02.4, mentre nelle Tavole T03.1 - T03.5 sono indicati i profili longitudinali dei corsi d'acqua oggetto di studio.

2.3. Acquisizione dei dati territoriali

Le basi cartografiche utilizzate sono costituite dalla Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10.000, 1:5.000 e 1:2000.

I dati Lidar sono stati forniti in parte dal Comune di Massa e in parte sono stati acquisiti presso la Regione Toscana.

3. ANALISI IDROLOGICA

L'analisi idrologica, mirata a fornire una valutazione delle portate di piena per i bacini ricadenti nel comune di Massa oggetto del presente studio, si basa sul modello implementato per gli studi a supporto del Piano Strutturale [4] e tiene conto degli studi a condotti dalla Università di Firenze per conto della Regione Toscana per l'aggiornamento delle curve di possibilità pluviometrica [5] e per la valutazione delle portate di piena per i corsi d'acqua dal Parmignola a Versilia [6].

Il modello è in grado di simulare sia il fenomeno della formazione dell'onda di piena che quello del suo trasferimento a scala di bacino e consente la ricostruzione dei deflussi di piena da utilizzare come input per le verifiche idrauliche.

In particolare si evidenzia quanto segue:

- le curve di possibilità pluviometrica sono quelle elaborate dalla Università di Firenze per conto della Regione Toscana aggiornate fino al 2012;
- gli ietogrammi di progetto sono stati assunti della stessa durata prevista nello studio [4] ovvero pari a 6 ore con andamento di tipo Chicago;
- la parametrizzazione delle caratteristiche idrologiche del suolo è stata condotta con le stesse tabelle di correlazione dello studio [4];
- nel presente studio le mappe della geolitologia e dell'uso del suolo sono quelle del PTC della provincia di Massa;
- i valori della velocità di trasferimento sono stati ricavati con lo stesso legame funzionale dello studio [4];
- i valori dei parametri di taratura sono derivati dallo studio [4]. Nel presente studio il grado di saturazione è stato variato in funzione del tempo di ritorno ed è stato inserito un valore massimo per ottenere valori di portata analoghi a quelli dello studio condotto dalla Università di Firenze per i bacini tra Parmignola e Versilia.

Il modello idrologico a parametri distribuiti utilizzato che prevede l'uso dei seguenti dati:

- curve di possibilità pluviometrica;
- modello digitale del terreno con maglia 25x25m;
- mappa geolitologica;
- mappa dell'uso del suolo.

Nella tavola T01.1. si riportano i bacini oggetto dello studio idrologico.

3.1. Le curve di possibilità pluviometrica

Le curve di possibilità pluviometrica sono quelle dello studio di approfondimento condotto dalla Università di Firenze che utilizza i dati pluviometrici al 2012.

La curva di possibilità pluviometrica può essere espressa nella forma generica:

$$h = a t^n$$

dove:

- h altezza di pioggia in [mm/h];
- a coefficiente dipendente dal tempo di ritorno [mm/hⁿ];
- n esponente della curva di possibilità pluviometrica.

Lo studio fornisce i valori di a e n su una maglia di 1kmx1km su tutto il territorio regionale per vari tempi di ritorno.

Approssimando la curva di crescita, che dipende dal modello probabilistico utilizzato per la stima delle altezze di pioggia per le varie durate e per i vari tempi di ritorno, con un legge di potenza la curva si possibilità pluviometrica può essere espressa nella forma:

$$h = a' t^n T^m$$

dove:

- a' coefficiente [$\text{mm}/\text{h}^n \text{y}^m$];
- T tempo di ritorno in anni [y].

Le mappe di a , n e m per i bacini in esame sono riportate nella tavola T01.2.

3.2. I dati territoriali

La caratterizzazione dei bacini idrografici oggetto di studio avviene attraverso l'impiego di opportune basi cartografiche contenenti le informazioni di input per il modello idrologico.

Le basi di dati cartografici, in formato digitale (*raster*), sono costituite da:

- modello digitale del terreno (DTM) 25x25m finalizzato al calcolo del *raster* dei puntatori;
- mappa dell'uso del suolo elaborata della cartografia del PTC della provincia di Massa;
- mappa delle formazioni geo-litologiche elaborata della cartografia del PTC della provincia di Massa.

Le legende per le mappe litologiche e dell'uso del suolo sono riportate nella Tabella 3-1 e Tabella 3-2.

Codice	Descrizione
1	Rocce Argillose
2	Rocce Calcaree
3	Rocce Arenacee
4	Rocce Silicee
5	Rocce Conglomerate e Breccioidi
6	Rocce Ofiolitiche
7	Coperture Detritiche
8	Sedimenti fluviali e lacustri
9	Rocce Cristalline Acide
10	Rocce Metamorfiche
11	Alluvioni Terrazze e depositi fluviolacustri
12	Frane attive e quiescenti

Tabella 3-1 – Legenda della cartografia geo-litologica.

Codice	Descrizione
1	Aree prevalentemente residenziali
2	Aree industriali
3	Grandi servizi urbani e di uso turistico
4	Vegetazione arborea
5	Vegetazione arbustiva
6	Vegetazione erbacea, prato, pascolo
7	Colture speciali
8	Oliveto
9	Vigneto
10	Seminativo
11	Roccia affiorante, aree non vegetate

Tabella 3-2 – Legenda della cartografia dell'uso del suolo.

Si è quindi operato sul modello digitale del terreno 25x25m (Figura 3-1) al fine di ricavare nel modo corretto il *raster* dei "puntatori idrologici e dei tempi di trasferimento". Il *raster* dei puntatori indica la direzione del deflusso superficiale e viene ricavato assumendo che ogni cella versi nella cella vicina a quota minore.

I tempi di trasferimento sono stati valutati nella ipotesi che la velocità di trasferimento nella singola sezione sia funzione dell'area del bacino a monte e della pendenza del reticolo idrografico. La relazione, i cui coefficienti numerici scaturiscono dalla fase di taratura, risulta del tipo:

$$v = 1.2 \times A^{0.15} \times S^{0.2}$$

dove v è la velocità di trasferimento in [m/s], A è l'area del bacino espresso in [km²], S è la pendenza dell'asta fluviale.

Dalle mappe della geo-litologia (Figura 3-3) e dell'uso del suolo (Figura 3-2), attraverso la stima dei parametri idraulici delle diverse formazioni corrette in base alle diverse coperture, vengono ricavate le mappe distribuite riguardanti la capacità di massima ritenuta del suolo e la velocità di infiltrazione a saturazione.

La capacità di ritenuta del suolo (indicata con SC , *Storage Capacity*) viene inizialmente stimata in funzione delle caratteristiche geo-litologiche. Nella Tabella 3-3 viene riportata l'associazione tra ogni classe geo-litologica e il valore medio e la deviazione standard della capacità di ritenuta¹.

¹ I valori delle classi 11 sono stati modificati rispetto allo studio [1] in funzione dei risultati dello studio [2].

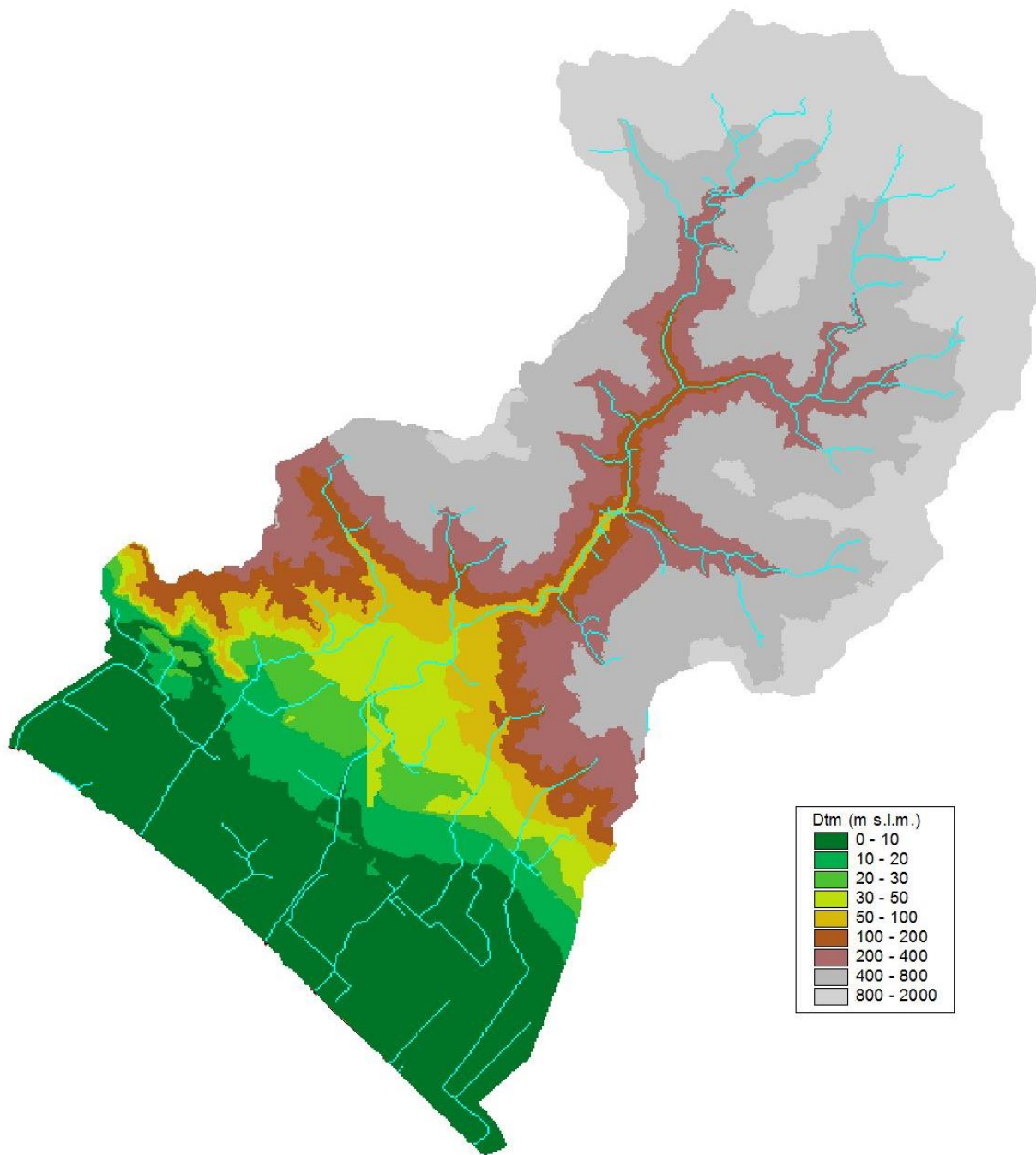


Figura 3-1 - Modello digitale del terreno

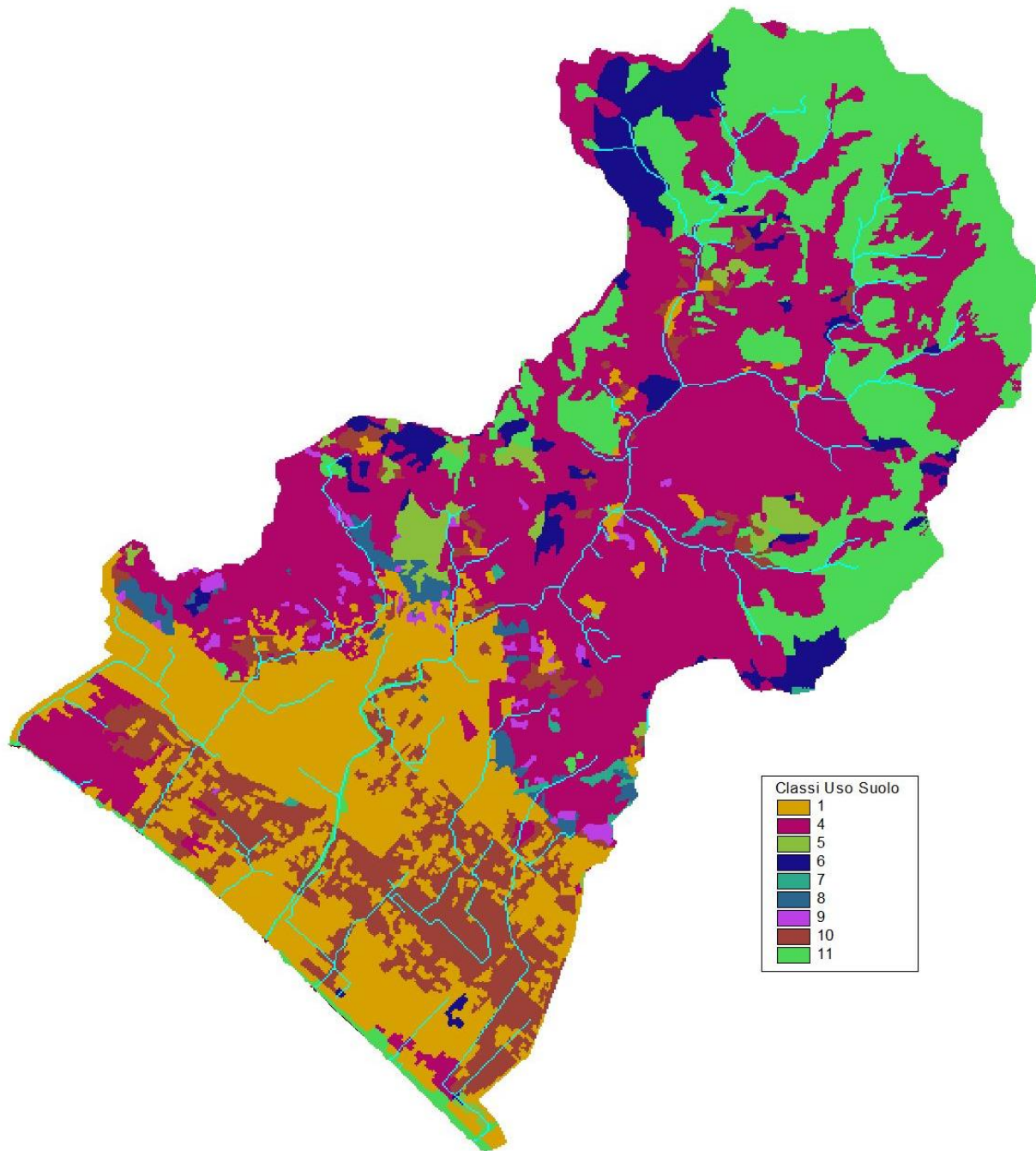


Figura 3-2 - Uso del suolo

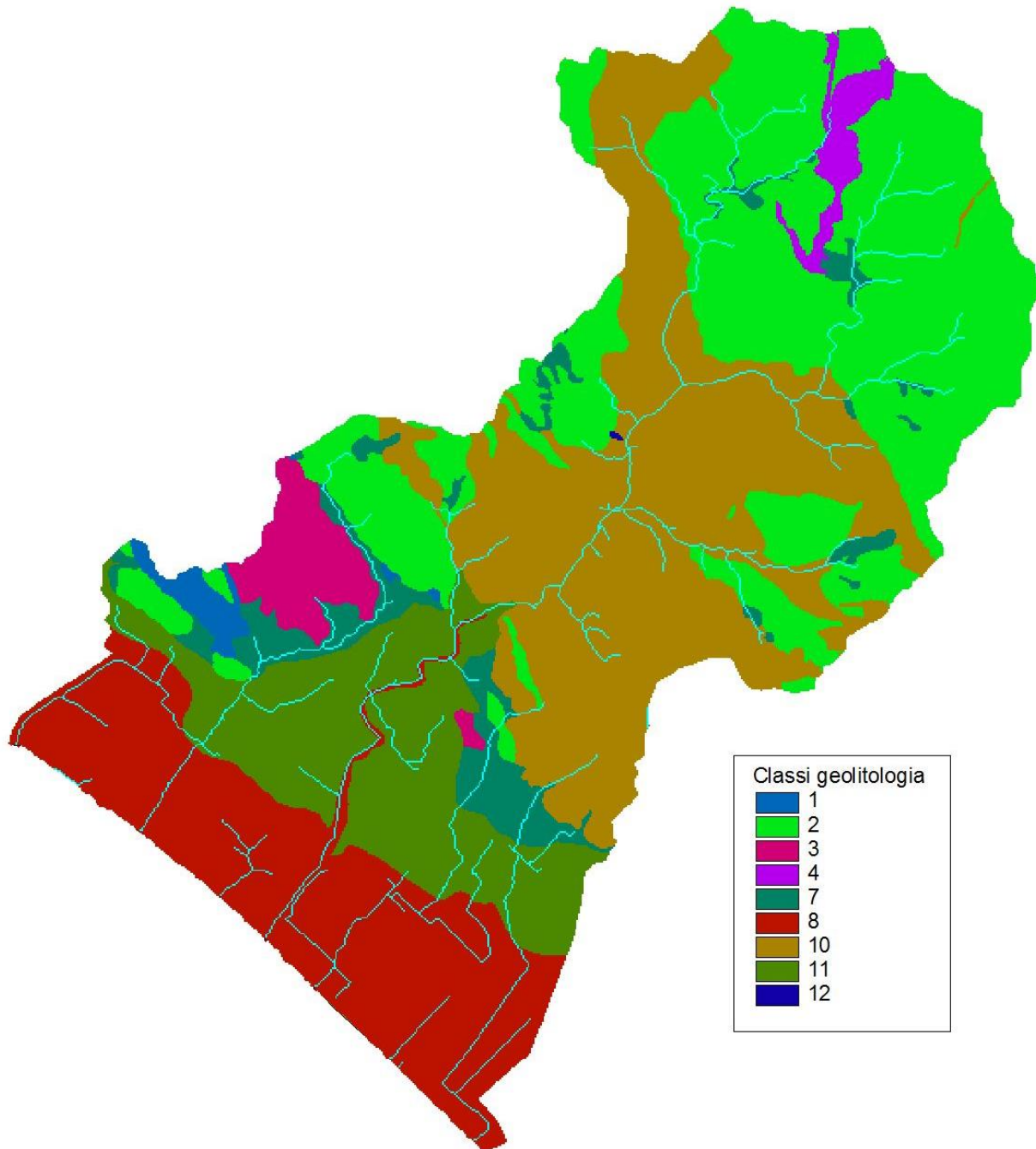


Figura 3-3 - Geolitologia

Codice	SC media [mm]	SC dev.sta. [mm]	Descrizione
1	60	30	Rocce Argillose
2	70	35	Rocce Calceree
3	70	35	Rocce Arenacee
4	60	30	Rocce Silicee
5	90	45	Rocce Conglomerate e Breccioidi
6	30	15	Rocce Ofiolitiche
7	100	50	Coperture Detritiche
8	120	60	Sedimenti fluviali e lacustri
9	50	25	Rocce Cristalline Acide
10	70	35	Rocce Metamorfiche
11	110	55	Alluvioni Terrazzate e depositi fluviolacustri
12	80	40	Frane attive e quiescenti

Tabella 3-3 – Capacità di ritenuta per ciascuna classe geo-litologica.

Alla capacità di ritenuta propria del suolo viene aggiunta un'ulteriore quota di potenziale accumulo riconducibile al fattore uso del suolo. Tale contributo rispecchia prevalentemente la capacità di intercettazione propria della vegetazione: non si tratta quindi di una modificazione della capacità di accumulo del suolo precedentemente stimata, quanto piuttosto di una possibile quantificazione di un fenomeno legato alla copertura vegetale. L'effetto è comunque, nell'ottica del modello idrologico utilizzato, equivalente ad una maggiorazione della capacità di ritenuta, e come tale viene computato. Anche in questo caso vengono riportati in Tabella 3-4, per ogni classe, un valore medio e la sua deviazione standard.

Codice	SC media [mm]	SC dev.sta. [mm]	Descrizione
1	0.1	0	Aree prevalentemente residenziali
2	0.1	0	Aree industriali
3	0.1	0	Grandi servizi urbani e di uso turistico
4	20	10	Vegetazione arborea
5	15	7	Vegetazione arbustiva
6	10	5	Vegetazione erbacea, prato, pascolo
7	5	2	Colture speciali
8	5	2	Oliveto
9	5	2	Vigneto
10	10	5	Seminativo
11	0.1	0	Roccia affiorante, aree non vegetate

Tabella 3-4 – Capacità di ritenuta aggiuntiva per ciascuna classe di uso del suolo.

Codice	IN media [mm/h]	IN dev.sta. [mm/h]	Descrizione
1	0.5	0.25	Rocce Argillose
2	4	2	Rocce Calcaree
3	2	1	Rocce Arenacee
4	1	0.5	Rocce Silicee
5	3	1.5	Rocce Conglomerate e Breccioidi
6	1	0.5	Rocce Ofiolitiche
7	8	4	Coperture Detritiche
8	1.2	0.6	Sedimenti fluviali e lacustri
9	0.5	0.25	Rocce Cristalline Acide
10	0.5	0.25	Rocce Metamorfiche
11	2	1	Alluvioni Terrazzate e depositi fluviolacustri
12	1	0.5	Frane attive e quiescenti

Tabella 3-5 – Velocità di infiltrazione a saturazione per ciascuna classe geo-litologica.

Come già accennato, i valori della velocità di infiltrazione a saturazione (K_s), che nel modello considerato regolano il meccanismo di perdite del suolo, vengono invece derivati dalle sole caratteristiche litologiche. Di seguito viene riportata la Tabella 3-5 che mette in relazione tali caratteristiche con i valori medi e la deviazione standard del suddetto fattore.

Codice	IN media [mm/h]	IN dev.sta. [mm/h]	Descrizione
1	0.30	0.15	Aree residenziali
2	0.30	0.15	Aree commerciali e servizi
3	0.20	0.10	Aree industriali
4	0.90	0.45	Trasporti, comunicazioni
5	1.00	0.50	Verde pubblico, giardini, parchi
6	1.30	0.65	Colture erbacee
7	1.10	0.55	Colture orto-floro-vivaistiche e frutteti in genere
8	0.90	0.45	Allevamenti zootecnici specializzati - Impianti agro industriali
9	0.90	0.45	Pertinenze agricole
10	1.00	0.50	Praterie, pascoli, incolti erbacei
11	1.00	0.50	Praterie, pascoli, incolti con alberi, arbusti e cespugli sparsi

Tabella 3-6 – Moltiplicatore della velocità di infiltrazione a saturazione.

La velocità di infiltrazione a saturazione così calcolata è stata corretta moltiplicandola con un fattore dipendente dall'uso del suolo variabile come riportato nella Tabella 3-6.

3.3. Il modello idrologico a parametri distribuiti

Il modello a parametri distribuiti prevede la schematizzazione a celle del bacino, per ciascuna delle quali viene definito un set di parametri che ne caratterizzano la risposta idrologica. Il modello necessita di una serie di mappe relative alle grandezze idrologiche e geografiche.

La redazione delle mappe relative alle grandezze idrologiche viene in genere condotta a partire dalla carta dell'uso del suolo e della geolitologia del bacino attribuendo a ciascun tipo di suolo o formazione geologica dei valori di riferimento e una data variabilità spaziale.

Per i dati geografici si utilizza un modello digitale del terreno (DTM) di maglia adeguata a consentire l'individuazione delle linee di impluvio e una corretta individuazione dei bacini imbriferi.

Il modello necessita inoltre dei dati di precipitazione che possono essere forniti come dato distribuito o puntuale. Nel secondo caso vengono acquisite le CPP in una serie di stazioni ricadenti nel bacino o limitrofe ad esso e le precipitazioni sono distribuite spazialmente con il metodo dei topoi.

Dal punto di vista concettuale il modello valuta dapprima la formazione del deflusso superficiale mediante la simulazione del fenomeno dell'intercettazione e, successivamente, il trasferimento di tale deflusso sino alla sezione di chiusura.

Il modello che simula il fenomeno dell'intercettazione calcola il deflusso superficiale di ciascuna cella, considerando sia la capacità di ritenuta del suolo che la velocità di infiltrazione a saturazione.

Il modello mette in conto anche la componente di deflusso ipodermico che raggiunge il reticolo con tempi maggiori rispetto al deflusso superficiale.

La simulazione delle modalità di trasferimento del deflusso superficiale si basa sulla schematizzazione del fenomeno mediante una componente di tipo cinematico e su una di tipo "serbatoio lineare" (modello tipo *Clark*).

Il tempo di trasferimento per ciascuna cella, dipendente da entrambi i fenomeni sopra richiamati, è stimato in funzione della sua distanza dalla foce. La descrizione della struttura del modello idrologico è riportata in Appendice A.

3.4. Le precipitazioni

L'input di precipitazione, in termini di ietogramma di pioggia, è stato ricavato sulla base curve di possibilità pluviometria (C.P.P.) prima riportate. Lo ietogramma è ricostruito sulla base delle C.P.P. secondo l'andamento temporale dello ietogramma tipo Chicago. Si tralascia in questa sede la descrizione dello ietogramma Chicago e del coefficiente di riduzione areale K_r .

La descrizione dello ietogramma Chicago e del coefficiente di riduzione areale K_r è riportata nella Appendice A.

Nel caso specifico il valore di r (rapporto tra la durata dell'evento e il tempo di picco) è stato fissato pari a 0.4 che bene rappresenta la forma degli ietogrammi di pioggia nell'area di studio. La durata degli eventi è stata assunta pari a 6 ore

3.5. I parametri del modello afflussi – deflussi

Il modello necessita della definizione dei seguenti parametri validi su tutto il bacino:

- α_0 = grado di saturazione iniziale [/];
- RI = coefficiente moltiplicativo del *raster* della capacità di ritenuta del suolo [/];
- IN = coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione [/];
- IP = coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica [/];
- MT = coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento [/];
- CI = coefficiente ripartizione cinematico-invaso [/].

I parametri sono stati derivati dallo studio [4]. Il grado di saturazione iniziale che è stato variato per ciascuna area e per ciascun tempo di ritorno in modo da ottenere dei valori di portata in linea con quelli previsti dagli studi condotti dalla Università di Firenze con il modello MOBIDIC. Inoltre è stato previsto un valore massimo del contributo unitario per ciascun bacino ricavato direttamente dai risultati dello studio dell'Università di Firenze.

Per le acque basse tali contributi unitari sono forniti in modo esplicito, per la parte delle acque alte tali contributi unitari sono stati ricavati per ciascun corso d'acqua in funzione dell'area del bacino secondo la seguente formula per ciascun tempo di ritorno:

$$q = aA^b$$

dove

- q contributo unitario in mc/s kmq;
- A area del bacino kmq;
- a e b parametri.

Tali contributi sono riportati nella Tabella 3-7.

Tempo di ritorno	Acque basse		Ricortola		Frigido		Canalmagro	
	a	b	a	b	a	b	a	b
20	4.409	0.000	5.255	-0.002	7.089	0.000	6.306	-0.111
30	4.834	0.000	5.835	-0.004	7.778	0.000	6.887	-0.109
200	7.076	0.000	8.874	-0.008	11.435	0.000	9.930	-0.104
500	8.351	0.000	10.612	-0.009	13.517	0.000	11.649	-0.102

Tabella 3-7 – Parametri per il calcolo dei contributi unitari in mc/s kmq.

Per le acque alte, ove possibile, sono stati utilizzati i contributi calcolati direttamente dai valori di portata al colmo forniti dalla Università di Firenze.

Alla porzione di bacino montano del fosso Lavello sono stati attribuiti i contributi unitari del torrente Ricortola e alla parte montana del fosso Magliano i contributi del torrente Canalmagro.

Nella Tabella 3-8 si riportano i valori dei parametri adottati per la ricostruzione delle portate di piena nelle diverse aree di seguito specificate:

- Bacino fosso Lavello;
- Bacino torrente Ricortola;
 - Torrente Ricortola
 - Fosso della Pernice;
 - Fosso San Lorenzo;
 - Fosso Castagnara;
- Bacino fiume Frigido;
 - Fiume Frigido;
 - Fosso Grande;
 - Fosso Ruotino;
 - Fosso Castellazzo;
 - Fosso Bocchetta;

- Bacino torrente Canalmagro;
 - Torrente Canalmagro;
- Bacini di acque basse:
 - Fosso Lavello;
 - Fosso Brugiano e affluenti;
 - Fosso Magliano;
 - Canale delle Grondini;
 - Fosso Colletto;
 - Fosso San Remigio;
 - Fosso dei Loghi;
 - Fosso Ronco;
 - Fosso Riva dei Ronchi;
 - Fosso Poveromo;
 - Fosso del Sale;
 - Canale degli Sforza.

TR		20	30	200	500
Grado di saturazione iniziale = α_0	Lavello	0.555	0.555	0.225	0.225
	Ricortola	0.455	0.455	0.165	0.165
	Brugiano	0.565	0.565	0.340	0.340
	Frigido	0.435	0.435	0.150	0.150
	Magliano	0.605	0.605	0.385	0.385
	Poveromo	0.580	0.580	0.360	0.360
	Canalmagro	0.350	0.350	0.020	0.020
	Sale - Sforza	0.580	0.580	0.385	0.385
Coefficiente di ripartizione cinematico/invaso = CI		0.7			
Molt. Velocità di trasferimento = MT		1.2			
Molt. Infiltrazione a saturazione = IN		1.0			
Molt. Capacità di Ritenuta = RI		1.2 ²			

Tabella 3-8 – Parametri del modello idrologico utilizzati per i vari bacini.

Per il calcolo degli idrogrammi di piena di progetto è stata trascurata la componente del deflusso ipodermico. Tale assunzione risulta comunque in favore di sicurezza in quanto l'introduzione della componente di deflusso ipodermico comporta una diminuzione delle portate al picco in ragione della minore entità dei deflussi superficiali.

3.6. Le portate di piena

La stima delle portate di piena è stata condotta considerando i tempi di ritorno pari a 20, 30, 200 e 500 anni. La valutazione degli idrogrammi di piena è stata condotta sulla base di quanto esposto nei paragrafi precedenti utilizzando il modello afflussi-deflussi i cui parametri sono stati tarati come descritto e applicando l'input di precipitazione con andamento temporale del tipo Chicago coerente con le Curve di Possibilità Pluviometrica. Le portate in ingresso al sistema con cui sono state condotte le verifiche idrauliche sono riportate nell'Allegato A01 alla presente relazione, mentre l'ubicazione dei punti di immissione è riportata nella Tavola T01.1.

² Per il torrente Canalmagro il parametro della capacità di ritenuta è stato fissato a 1.4

3.7. Confronto con gli studi precedenti

Nella *Tabella 3-9* si riportano i valori di portata al colmo stimati per i diversi corsi d'acqua in identiche sezioni tra lo studio [3] a supporto del P.S. e il presente studio a supporto del R.U..

Corso d'acqua	TR	P.S.	R.U.
Lavello	30	13.00	23.67
	200	29.56	34.47
Ricortola	30	47.34	44.77
	200	67.44	62.27
Brugiano	30	7.94	16.58
	200	19.45	24.27
Frigido	30	326.79	443.15
	200	469.00	630.76
Magliano	30	22.36	46.93
	200	50.64	68.71
Poveromo	30	3.46	6.63
	200	7.72	9.71
Canalmagro	30	15.44	14.56
	200	30.75	19.20
Sale	30	2.91	5.29
	200	7.21	7.74

Tabella 3-9 – Confronto portate studio P.S. e studio R.U.

Si osserva che per le acque basse le portate trentennali sono circa raddoppiate mentre le portate con tempo di ritorno di 200 anni sono aumentate del 25%.

Per quanto riguarda il Ricortola la portata trentennale è diminuita di un 5% e la portata duecentennale di un 7%.

Per il Frigido la portata trentennale e quella duecentennale sono aumentate di circa il 35%.

Per quanto riguarda il Canalmagro la portata trentennale è diminuita del 6% e la portata duecentennale del 38%.

Tali differenze sono in parte dovute alle diverse curve di possibilità pluviometrica e all'uso da parte della Università di Firenze di un diverso modello idrologico con una diversa parametrizzazione della risposta idrologica dei suoli.

4. ANALISI IDRAULICA

Al fine di rappresentare adeguatamente i diversi fenomeni che governano la propagazione delle piene all'interno dei corsi d'acqua, la loro laminazione per effetto di casse di espansione, nonché la diffusione dei volumi idrici di inondazione sul territorio, è stata adottata una modellistica idraulica che comprende un modello di tipo unidimensionale, idoneo a rappresentare il moto all'interno dell'alveo, accoppiato ad un modello bidimensionale per la simulazione dei fenomeni d'inondazione del territorio.

Il modello idraulico è descritto in Appendice B.

4.1. Il modello digitale delle aree inondabili

Per la simulazione con il modello bidimensionale è stato utilizzato un modello digitale del terreno a celle di 10mx10m, elaborato a partire dal rilievo Lidar dell'area di studio.

Per una piccola parte del territorio (zona sud-est) il modello Lidar non è disponibile per cui si è fatto riferimento alla Carta Tecnica Regionale in scala 1:2000 della Regione Toscana.

I punti quotati e le curve di livello sono stati estratti dalla cartografia filtrando i punti non rappresentativi o errati. In particolare sono stati utilizzati i seguenti strati informativi:

- 801 Curve di livello direttrici;
- 802 Curve di livello ordinarie;
- 803 Curve di livello ausiliarie;
- 804 Quote del suolo.

Nella predisposizione del modello digitale del terreno si è posta particolare attenzione nella ricostruzione dei rilevati della ferrovia e dell'autostrada. In particolare il modello digitale Lidar con passo 2mx2m è stato aggregato a 10mx10m ricavando sia la media delle quote sulla cella che il massimo valore. In corrispondenza dei rilevati si è assunto il valore massimo mentre negli altri casi si è assunto il valore medio. In questo modo è stata salvaguardata la quota delle strutture di contenimento.

I sottopassi dei suddetti rilevati sono stati schematizzati con portelle di collegamento.

Il modello digitale del terreno è riportato nelle Tavola T02.1.

Il modello digitale del terreno descrive la morfologia del territorio potenzialmente allagabile dai corsi d'acqua verificati, e si estende dalla costa fino a monte dei tratti descritti dalle sezioni fluviali.

Il modello digitale del terreno è collegato alle sezioni fluviali attraverso una serie di soglie sfioranti la cui quota è ricavata dalle sezioni fluviali e la lunghezza è pari alla risoluzione del modello digitale.

4.2. I parametri del modello idraulico

La modellazione idraulica è stata condotta con un passo temporale di 5 minuti. Il coefficiente di Gauckler-Strickler adottato per i diversi tratti è riportato nella

Tratto	Tratti e cielo aperto G.S. [$m^{1/3}s^{-1}$]	Tombamenti e ponti G.S. [$m^{1/3}s^{-1}$]
Fosso Lavello	30	45;
Torrente Ricortola a monte della confluenza del fosso Pernice	24	30
Torrente Ricortola a valle della confluenza del fosso Pernice	30	45
Fosso della Pernice	24	30
Fosso San Lorenzo	24	30
Fosso Castagnara	24	30
Fosso Brugiano e affluenti	30	45
Fiume Frigido a monte della confluenza della Fossa Grande	24	30
Fiume Frigido a valle della confluenza della Fossa Grande	30	45
Fosso Grande	24	30
Fosso Ruotino	24	30
Fosso Castellazzo	24	30
Fosso Bocchetta;	24	30
Fosso Magliano	30	45
Canale delle Grondini a monte della ferrovia	24	30
Fosso Colletto	24	30
Fosso San Remigio	24	30
Canale delle Grondini a valle della ferrovia	30	45
Fosso dei Loghi	30	45
Fosso Ronco	30	45
Fosso Riva dei Ronchi	30	45
Fosso Poveruomo	30	45
Torrente Canalmagro a monte di Sei Ponti	24	30
Torrente Canalmagro a valle di Sei Ponti	30	45
Fosso del Sale	30	45
Canale degli Sforza	30	45

Tabella 4-1 - Scabrezze modello idraulico

I coefficienti di contrazione e di espansione sono stati assunti pari a 0.1 (contrazione) e 0.2 (espansione) in condizioni normali mentre in corrispondenza dei ponti sono stati utilizzati i coefficienti 0.4 (contrazione) e 0.5 (espansione).

Le scabrezze adottate tengono conto della pendenza e della morfologia del corso d'acqua e dei potenziali fenomeni di sovralluvionamento.

Per la modellazione bidimensionale è stata utilizzata una scabrezza K_s di Gauckler-Strickler pari a 20 $m^{1/3}s^{-1}$ per le superfici aperte e di 2 $m^{1/3}s^{-1}$ per gli edifici desunti dalla cartografia C.T.R. 1:2000 della Regione Toscana.

4.3. Gli elementi del modello idraulico

Le verifiche idrauliche sono state condotte utilizzando la modellistica descritta nei precedenti capitoli ed applicata per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni ai seguenti bacini e per i relativi corsi d'acqua:

- Bacino Lavello
 - Fosso Lavello

- Bacino Ricortola
 - Torrente Ricortola
 - Fosso della Pernice;
 - Fosso San Lorenzo;
 - Fosso Castagnara;

- Bacino Brugiano
 - Fosso Brugiano
 - Fosso Dalmine
 - Fosso Becaro
 - Fosso Silcia
 - Fosso di Mezzo
 - Fosso Lodolina
 - Fosso Connettore
 - Fosso Tornabuoni
 - Fosso Nuovo

- Bacino fiume Frigido
 - Fiume Frigido
 - Fosso Grande
 - Fosso Ruotino
 - Fosso Castellazzo
 - Fosso Bocchetta

- Bacino Magliano
 - Fosso Magliano;
 - Canale delle Grondini;
 - Fosso Colletto;
 - Fosso San Remigio;
 - Fosso dei Loghi;
 - Fosso Ronco;
 - Fosso Riva dei Ronchi;

- Bacino Poveromo
 - Fosso Poveromo

- Bacino Canalmagro
 - Torrente Canalmagro
 - Fosso del Sale
 - Canale degli Sforza

Nelle Tavole T02.2 - T02.4 è riportata la planimetria delle sezioni utilizzate per le verifiche idrauliche.

Nel sistema idraulico sono state inserite le due casse di espansione presenti sul torrente Canalmagro a monte e a valle dell'autostrada Genova-Rosignano, le cui caratteristiche geometriche sono riportate in Tabella 4-2.

Posizione	Superficie cassa (al piede esterno dell'argine) [m ²]	Quota media fondo cassa [m slm]	Altezza argini cassa [m slm]
Monte A12	36813	2.54	4.30
Valle A12	46247	1.89	3.10

Tabella 4-2 – Caratteristiche geometriche delle casse di espansione presenti sul t. Canalmagro.

Le due casse sono provviste di opere di sfioro regolate da paratoie automatiche. I parametri che regolano l'apertura delle paratoie, assunti nella presente modellazione, sono riportati nella Tabella 4-3.

Posizione	Larghezza paratoia [m]	Quota paratoia chiusa [m s.l.m.]	Quota paratoia aperta [m s.l.m.]	Quota inizio apertura paratoia [m slm]	Quota apertura totale paratoia [m slm]	Quota chiusura paratoia [m slm]
Monte A12	5.50	6.45	4.20	5.65	5.95	3.80
Valle A12	3.10	5.15	2.90	4.35	4.65	2.60

Tabella 4-3 – Caratteristiche geometriche delle casse di espansione presenti sul t. Canalmagro.

Gli argini della cassa sono più bassi degli argini dell'alveo, per questo motivo le paratoie devono essere manovrate manualmente di evitare la tracimazione.

I volumi idrici non contenuti all'interno del sistema alveo-casse di espansione costituiscono i volumi di inondazione la cui dinamica di propagazione sul territorio è stata simulata mediante apposito modello bidimensionale.

Il modello prevede sia che le acque possano esondare dal reticolo fluviale verso la campagna sia che possano rientrare in alveo qualora ve ne siano le condizioni.

Le sezioni fluviali sono collegate, in destra e in sinistra idraulica, al modello digitale del terreno e alle casse di espansione mediante le soglie sfioranti fisse precedentemente descritte: ogni soglia è posta alla quota del massimo contenimento della sezione (sponda o argine) ed ha una lunghezza pari alla risoluzione del modello digitale (10m).

La quota delle soglie sfioranti rimane fissa durante la simulazione in assenza di rotture arginali mentre si abbatte fino al piano campagna in caso sia simulata la rottura arginale.

E' stata considerata la possibilità che i volumi di esondazione possano transitare fino alla costa per raggiungere direttamente il mare; pertanto, nel modello bidimensionale, è stata inserita una serie di soglie sfioranti poste lungo tutta la linea di costa, che determinano la connessione idraulica tra la costa ed il mare.

Come condizione al contorno a mare sono stati utilizzati i livelli riportati nella Tabella 4-4.

Tr	Livelli [m sl.m.]
20	1.00
30	1.10
200	1.30
500	1.40

Tabella 4-4 . Livelli del mare.

In corrispondenza dei canali con idrovora alla foce il livello del mare all'istante iniziale è stato assunto pari a 0.0 m s.l.m. e gradualmente elevato fino alla quota riportata nella Tabella 4-4

Nel modello bidimensionale sono stati inseriti gli attraversamenti presenti lungo la ferrovia Pisa-Genova e lungo l'autostrada Genova-Rosignano (sottovia, tombini) per simulare il transito dei volumi di esondazione attraverso il rilevato autostradale e quello ferroviario; la geometria dei suddetti attraversamenti è stata acquisita dal profilo longitudinale della ferrovia forniti da RFI S.p.a. - zona territoriale centro nord e dal profilo longitudinale dell'autostrada fornito da SALT – Società Autostrada Ligure Toscana.

Nella modellazione idraulica sono state inserite le idrovore presenti alla confluenza del canale degli Sforza nel fiume Versilia, sul fosso Brugiano a monte del ponte sul Lungomare Amerigo Vespucci e sul fosso Magliano a monte del ponte di Via Gioacchino Rossini come riportato in *Tabella 4-5*.

Denominazione	Numero gruppi	Portata [mc/s]
Idrovora Calatella (Lavello)	2	0.6
Idrovora Bozzone (Lavello)	2	0.6
Idrovora Brugiano	2	6.5
Idrovora Magliano	2	1.0
Idrovora Sforza	2	1.0

Tabella 4-5– Impianti idrovori presenti nel sistema

Nella modellazione idraulica sono stati considerati gli apporti al torrente Canalmagro dati dalle reti fognarie presenti a monte dell'autostrada Genova-Rosignano, individuati in corrispondenza di Via Acqualunga, Via Marina e Via San Cristoforo tra il ponte di Via Mulazzo e il ponte di Via Traversa. La fognatura è stata schematizzata come una cassa di espansione avente la geometria della fogna, connessa idraulicamente al torrente Canalmagro con delle portelle dotate di valvola antiriflusso.

4.4. Gli scenari di verifica

Il modello idraulico precedentemente descritto è stato implementato sui 7 bacini per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni in assenza di rotture arginali e per i tre bacini di acque alte (Ricortola, Frigido e Canalmagro) anche in presenza di rotture arginali per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni.

In ragione del fatto che il modello idraulico è in grado di simulare sia l'esondazione che il rientro in alveo delle portate esondate qualora questo sia possibile in funzione della morfologia del territorio e che le esondazioni sono dovute in massima parte alla insufficienza della sezione del corso d'acqua per ciascun tempo di ritorno è stato implementato un unico scenario di verifica con diminuzione della portata a seguito delle esondazioni.

La rottura arginale in accordo con i criteri della Autorità di Bacino è stata valutata in quei tratti ove si ha esondazione per sormonto arginale.

Le verifiche con rottura arginale sono state condotte ipotizzando per ciascun corso d'acqua uno scenario con rottura in destra e uno scenario con rottura in sinistra idraulica.

4.5. I risultati della verifica

La verifica idraulica ha fornito per ogni bacino e per ogni tempo di ritorno i seguenti valori:

- portate e livelli idrometrici per ogni sezione del reticolo idrografico;
- livelli idrometrici e velocità in ciascuna cella delle aree di esondazione;
- portate transitate attraverso gli elementi di connessione tra l'alveo e le aree e tra le aree stesse.

Nell'Allegato A02 sono riportati i tabulati delle verifiche idrauliche.

Nell'Allegato A03 sono riportate le sezioni fluviali con i massimi livelli idrici valutati.

Nelle Tavole T03.1 - T03.5 sono riportati i profili longitudinali dei corsi d'acqua con i massimi livelli idrometrici valutati, per i quattro tempi di ritorno in assenza di rotture arginali.

Nelle Tavole T04.1.- T04.7 sono riportati i massimi battenti di esondazione e le massima velocità di propagazione rispettivamente per il tempo di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni in assenza di rotture arginali per i singoli corsi d'acqua.

Nelle Tavole T04.8.- T04.10 sono riportati i massimi battenti di esondazione e le massima velocità di propagazione rispettivamente per il tempo di ritorno di 30 e 200 anni con rotture arginali per i singoli corsi d'acqua.

Nelle Tavole T05.1 - T05.4 si riporta l'inviluppo dei battenti di esondazione in assenza di rottura arginale.

Nelle Tavole T05.5 - T05.6 si riporta l'inviluppo dei battenti di esondazione in presenza di rottura arginale.

5. DELIMITAZIONE DELLE AREE INONDABILI E DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA

5.1. Le aree inondabili

Per i corsi d'acqua oggetto dello studio idraulico sono state definite le aree inondabili per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni in assenza di rotture arginali (Tavola T06.1) e per le acque alte anche le aree inondabili per i tempi di ritorno di 30 e 200 anni (Tavola T06.2).

Le mappe sono state calcolate per inviluppo delle aree inondabili derivanti dalle verifiche per i diversi bacini.

La mappatura delle aree inondabili è stata condotta sulla base delle mappe dei battenti e delle velocità di propagazione.

Nella Tabella 5-1 sono riportati i valori delle superfici complessivamente inondate per i tempi di ritorno di 20, 30, 200 e 500 anni in assenza di rotture arginali e nella Tabella 5-2 i valori delle superfici complessivamente inondate i tempi di ritorno di 30 e 200 anni con ipotesi di rottura arginale.

S_{20} [ha]	S_{30} [ha]	S_{200} [ha]	S_{500} [ha]
549.7	688.0	1135.9	1456.8

Tabella 5-1 – Superficie inondata nello stato attuale.

S_{30} [ha]	S_{200} [ha]
892.4	1461.5

Tabella 5-2 – Superficie inondata nell'ipotesi di rottura arginale nello stato attuale.

Le aree inondabili sono dovute in parte a fenomeni di transito e in parte a fenomeni di ristagno. Le zone di ristagno sono particolarmente evidenti a intorno al fosso Brugiano, al Magliano e a valle della autostrada e intorno al fosso del Sale. Le aree in transito risultano particolarmente evidenti nel caso del t. Ricortola dove le esondazioni che si verificano in sinistra idrografica, nei tratti a monte della linea ferroviaria Genova-Pisa, si propagano sino al f. Frigido riuscendo a raggiungere anche l'autostrada A12, mentre quelle che si verificano in destra idrografica sono in grado di raggiungere il fosso Lavello. Un altro caso particolarmente evidente di transito si verifica sul f. Magliano a seguito dei notevoli volumi esondati in corrispondenza del tratto compreso tra il ponte sulla ferrovia ed il tombamento a valle della stessa.

5.2. La pericolosità idraulica del 53/R

Il regolamento 53/R definisce le seguenti pericolosità idrauliche definite sulla base di uno studio idrologico e idraulico:

- 14 aree inondabili per tempi di ritorno inferiori a 30 anni;
- 13 aree inondabili per tempi di ritorno compresi tra 30 anni e 200 anni;
- 12 aree inondabili per tempi di ritorno compresi tra 200 anni e 500 anni.

Tale classificazione è stata utilizzata sulle aree inondabili in assenza di rottura arginale.

Alle aree inondabili in presenza di rottura arginale è stata applicata la seguente classificazione:

- I.2 aree inondabili con per tempi di ritorno compresi tra 30 anni e 200 anni;
- I.3 aree inondabili per tempi di ritorno inferiori a 30 anni.

Tale classificazione è giustificata dal fatto che la probabilità composta del verificarsi di un evento con un dato tempo di ritorno che comporti un sormonto dell'argine e della rottura dell'argine comporta un evento complessivo con tempo di ritorno sicuramente superiore a quello attribuibile su base idrologica.

Nella si

Tabella 5-3 si riporta l'estensione delle superfici perimetrate a diversa pericolosità idraulica ai sensi del D.P.G.R. 53/R.

I.4 [ha]	I.3 [ha]	I.2 [ha]
688.0	1226.3	1711.5

Tabella 5-3 – Superficie a diversa pericolosità ai sensi del D.P.G.R. 53/R nello stato attuale.

Nella Tavola T07 è riportata la pericolosità idraulica come definita dal Regolamento Regionale 53/R.

5.3. La pericolosità idraulica del PAI

Il Piano di Assetto idrogeologico (PAI) definisce le seguenti pericolosità:

- P.I.M.E. aree inondabili con $TR \leq 30$ anni;
- P.I.E. aree inondabili con $30 \text{ anni} < TR \leq 200$ anni.

Tale classificazione è stata utilizzata sulle aree inondabili in assenza di rottura arginale.

In analogia alla pericolosità ai sensi del Regolamento 53/R alle aree inondabili in presenza di rottura arginale è stata applicata la seguente classificazione:

- P.I.E. aree inondabili con $TR \leq 30$ anni.

Nella si Tabella 5-4 si riporta l'estensione delle superfici perimetrate a diversa pericolosità idraulica ai sensi del PAI.

Denominazione	P.I.M.E. [ha]	P.I.E. [ha]
Bidimensionale Massa	688.0	1226.3

Tabella 5-4 – Superficie a diversa pericolosità ai sensi del PAI nello stato attuale

Nella Tavola T08 è riportata la pericolosità idraulica come definita dalla Autorità di Bacino Toscana Nord (aree PIME e PIE).

6. OSSERVAZIONI CONFERENZA DI SERVIZI

In data 13 giugno 2014 veniva convocata una conferenza di servizi ai sensi dell'art. 13 comma 2 del DPGRT n.53/R.

Nel corso della conferenza di servizi sono state formulate le osservazioni che di seguito si riportano in modo sintetico:

1. Portate di piena: La Regione Toscana ha dato incarico all'Università di Firenze di aggiornare sia le curve di possibilità pluviometrica che la valutazione delle portate di piena per i corsi d'acqua ricadenti nell'ambito di studio. Lo studio consegnato si basa sul modello implementato per gli studi a supporto del Piano Strutturale. Le portate calcolate dalla Università di Firenze per la Regione Toscana sono in fase di validazione e non ancora disponibili. Peraltro sarebbe auspicabile, come precisato dal Genio Civile di Massa, che lo studio tenesse conto di questo aggiornamento che potrebbe fornire risultati più cautelativi.
2. Sovralluvionamento: Nelle linee guida per l'aggiornamento della pericolosità idraulica della Autorità di Bacino Toscana Nord del 2011 si richiede di valutare eventuali fenomeni di sovralluvionamento e di tenerne conto nel calcolo dei livelli di piena. Nello studio consegnato tale fenomeno era stato considerato adottando dei valori di scabrezza cautelativi. Il Genio Civile ha richiesto di illustrare e argomentare le scelte effettuate.
3. Attenuazione delle portate: Le linee guida per l'aggiornamento della pericolosità idraulica della Autorità di Bacino Toscana Nord del 2011 ammettono che si possa tenere in conto di una diminuzione delle portate da monte verso valle a causa delle esondazioni solo nell'ipotesi in cui sia dimostrabile che a tali volumi sia preclusa ogni possibilità di ritornare in alveo per esistenza di argini e solo qualora tali esondazioni non siano dovute alla presenza di manufatti in alveo non classificabili come opere idrauliche quali ad esempio attraversamenti di sezione insufficiente. Il modello adottato attenua in ogni caso la portata in ragione delle esondazioni e consente di valutare i volumi che possono ritornare in alveo. Il Genio Civile ha richiesto di motivare la scelta effettuata.
4. Rotture arginali: Le linee guida per l'aggiornamento della pericolosità idraulica della Autorità di Bacino Toscana Nord del 2011 affermano che non sarà ritenuta valida l'ipotesi di assenza di rottura del corpo arginale in tutti quei casi in cui siano presenti scarse caratteristiche geometriche (in termini di larghezza della sommità arginale, di pendenza delle scarpate etc.), geotecniche e di consistenza del corpo arginale. Il modello adottato simula il fenomeno di esondazione per sormonto del rilevato arginale assumendo che l'argine non collassi, inoltre non prevede l'eventualità che l'argine collassi anche in assenza di sormonto. Il Genio Civile chiede che vengano effettuate valutazioni in merito all'eventualità di possibili rotture arginali
5. Carta pericolosità idraulica: Le linee guida per l'aggiornamento della pericolosità idraulica della Autorità di Bacino Toscana Nord del 2011 richiedono che il modello del terreno, sul quale saranno eseguite le simulazioni per l'individuazione delle aree allagabili rappresenti la morfologia del terreno e delle discontinuità lineari (infrastrutture, argini, etc.) considerando, ove peggiorativi per le aree in esame, la presenza di connessioni idrauliche (sottopassi, tombini di collegamento, etc.). Richiede inoltre che gli edifici siano considerati nella loro interezza rispetto alla definizione dei perimetri delle aree allagate. Il modello adottato si basa sul rilievo DTM Lidar 1mx1m aggregato a 10mx10m. Nella fase di aggregazione si è tenuto conto delle maggiori discontinuità lineari, ferrovia e autostrada, e sono stati inseriti i tombini e i sottopassi al disotto delle due strutture. Il modello digitale del terreno (DTM) non rappresenta gli edifici che sono invece presenti nel modello del suolo (DSM). Il modello 10mx10m non consente di rappresentare i singoli edifici la cui presenza può essere considerata variando

opportunamente la scabrezza del modello. Ulteriori discontinuità lineari possono essere inserite qualora si ritenga che le stesse siano in grado di svolgere una funzione idraulica di contenimento delle acque. Il Genio Civile chiede che a ogni edificio sia assegnata una unica classe di pericolosità.

6.1. Portate di piena

Nel presente studio sono stati acquisiti i risultati degli studi condotti dalla Università di Firenze per l'aggiornamento delle curve di possibilità pluviometrica [5] e per la valutazione delle portate di piena con il modello MOBIDIC [6].

I parametri del modello dello studio di supporto al P.S. [4] sono stati adeguati in modo da simulare per i vari sottobacini portate congruenti con quelle dello studio della Università di Firenze. In particolare sono state modificate le saturazioni iniziali ed è stato inserito un valore del contributo idrologico massimo per ciascuna sezione e per ciascun tempo di ritorno.

Per le acque basse il valore di tali contributi era fornito direttamente nello studio della Università di Firenze, per le acque alte tale contributo è stato ricavato dai valori puntuali forniti nello stesso studio.

Le portate utilizzate per le simulazioni nel presente studio sono pertanto congruenti con quelle valutate dalla Università di Firenze per la Regione Toscana.

6.2. Sovralluvionamento

Il fenomeno del sovralluvionamento dei corsi d'acqua in occasione di eventi meteorici particolarmente intensi rappresenta un aspetto importante sia per la valutazione delle criticità del corso d'acqua e del relativo rischio di esondazione che per la progettazione degli interventi di messa in sicurezza.

Il sovralluvionamento si verifica quando la capacità di trasporto dei sedimenti in un certo tratto del canale è inferiore alla quantità di materiale che affrisce da monte.

Tale fenomeno si verifica sia nel caso vi sia una riduzione locale della capacità di trasporto dovuta ad esempio a cambi di pendenza, alla presenza di attraversamenti che comportano un restringimento dell'alveo, all'accumulo di materiale flottante con ostruzione della sezione che nel caso vi sia da monte un eccessivo apporto di materiale dovuto ad esempio a dissesti di versante.

Occorre inoltre precisare che il fenomeno del sovralluvionamento si evolve in modo impulsivo in occasione di eventi di piena particolarmente intensi in grado di movimentare il materiale dei versanti e dell'alveo.

Il fenomeno del trasporto solido ha infatti un comportamento non lineare, ovvero al di sotto di una certa portata risulta insignificante mentre diventa significativo se si raggiungono certi valori.

La complessità dei fenomeni in gioco e la loro aleatorietà rende la valutazione del sovralluvionamento molto complessa in modo particolare se lo stesso deve essere affrontato alla scala di uno studio di pianificazione come quello in oggetto.

Si ritiene pertanto che alla scala dello studio in oggetto tale fenomeno possa essere modellato per via parametrica o aumentando le scabrezze o riducendo la dimensione della sezione liquida.

Nel presente studio tale si è optato per adottare dei valori di scabrezza cautelativi riportati nella *Tabella 4-1*.

Poiché il fenomeno del sovralluvionamento risulta più critico sul reticolo minore, come hanno dimostrato anche i recenti eventi del 2012, per tali corsi d'acqua sono stati adottati i valori più bassi.

Il coefficiente utilizzato è quello di Gaukler-Strickler con valori variabili dal $30 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ a $24 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$.

Nella *Tabella 6-1* si riporta una descrizione dei parametri di scabrezza tratta dall'Allegato 5 alle Norme di Attuazione del PAI del fiume Magra.

Descrizione corso d'acqua	Ks di Gaukler -Strickler [$\text{m}^{1/3} \text{s}^{-1}$]
Alvei naturali con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea, fondo mobile con materiale di grossa pezzatura, alvei in roccia con sporgenze e grossi massi	20-25
Alvei naturali tortuosi con presenza di vegetazione arbustiva e arborea, fondo mobile con sedimenti di media pezzatura	25-30
Alvei naturali rettilinei con scarsa presenza di vegetazione arbustiva e arborea, fondo mobile con sedimenti di piccola pezzatura	30-35
Alvei artificiali inerbiti in assenza di vegetazione arbustiva e arborea	35-40
Alvei artificiali rivestiti in calcestruzzo in assenza di manufatti interferenti con le acque	40-45

Tabella 6-1 - Parametri di scabrezza

Le modalità di parametrizzazione del fenomeno del sovralluvionamento sono in accordo con quanto riportato nelle linee guida della Autorità di Bacino Toscana Nord del 2011 dove si legge:

"Dovranno essere specificate e motivate le condizioni al contorno assunte ed i coefficienti di scabrezza utilizzati, nonché tutte le informazioni necessarie all'interpretazione dei profili di rigurgito. Particolare attenzione va posta ai tratti in corrispondenza di opere per le quali devono essere effettuate opportune valutazioni a causa della modifica delle sezioni (o del fondo) influenti sui livelli idrici della piena (es.: ostruzioni per il materiale flottante e variazioni del fondo anche in corrispondenza di opere di sfioro), eventualmente riferendosi a valori di scabrezza estremamente prudenziali che tengono conto dello stato di conservazione del corso d'acqua."

6.3. Attenuazione delle portate

Il modello idraulico adottato nello studio è composto da una parte monodimensionale per l'alveo e da una parte bidimensionale per le aree inondabili. Il collegamento tra le due componenti avviene attraverso una serie di soglie sfioranti con funzionamento bidirezionale in funzione dei livelli a monte e a valle. Il flusso può pertanto avvenire dall'alveo verso le aree inondabili oppure dalle aree inondabili verso l'alveo.

E' importante precisare che le due componenti del modello lavorano contemporaneamente. A per ogni passo di simulazione vengono risolte le equazioni di continuità e moto sia nell'alveo che nelle aree inondabili.

Nelle linee guida si dice che è ammesso considerare l'attenuazione della piena solo se è accertato che le acque non possano ritornare in alveo. Nel caso specifico tale problematica è superata in quanto le acque possono esondare ma anche ritornare in alveo se la morfologia del terreno e dell'alveo lo consentono.

Per quanto riguarda la precisazione contenuta nelle linee guida che le esondazioni non devono essere dovute alla presenza di manufatti insufficienti non classificabili come opere idrauliche si osserva che non è di fatto possibile distinguere se l'esondazione sia dovuta a una insufficienza strutturale del corso d'acqua (sezione insufficiente, argini bassi, etc) o alla presenza di un attraversamento insufficiente e in che misura. Nei casi esaminati le due problematiche di norma contribuiscono insieme a determinare la criticità che porta alla esondazione.

Inoltre si osserva che le portate esondate in una sezione di monte di norma propagano verso valle andando a interessare anche aree ove il corso d'acqua nelle immediate vicinanze può non risultare critico.

Lo scopo della norma è quello di non sottostimare le aree inondabili a valle in ragione di esondazioni a monte dovute a attraversamenti insufficienti. In tal senso si osserva che nella progettazione di un qualunque intervento sul corso d'acqua, compreso l'adeguamento di un eventuale ponte insufficiente, si deve sempre valutare l'aggravio a valle e qualora lo stesso sia ritenuto significativo l'intervento non viene autorizzato indipendentemente dalla perimetrazione della pericolosità che compete a tali aree.

Si ritiene pertanto che il modello adottato fornisca certamente un quadro della pericolosità idraulica più vicino alla realtà rispetto al non considerare l'attenuazione delle portate di piena.

6.4. Rotture arginali

In ottemperanza a quanto previsto dai "Criteri per lo sviluppo degli studi ai fini della valutazione di proposte di modifica delle aree a pericolosità idraulica molto elevata ed elevata" del Bacino Regionale Toscana Nord approvati nel Comitato Tecnico del 10/06/2011 sono stati modellati per la rete delle acque alte una serie di scenari nei quali a seguito del sormonto arginale vi fosse la rottura dell'argine stesso.

Si è assunto pertanto che le caratteristiche geometriche (in termini di larghezza della sommità arginale, di pendenza delle scarpate etc.), geotecniche e di consistenza del corpo arginale non fossero tali da garantire in ogni occasione il sormonto senza rottura.

Per i torrenti Ricortola, Frigido e Canalmagro sono state effettuate due simulazione una con rottura in destra idraulica e una con rottura in sinistra.

In termini di pericolosità idraulica sia essa riferita al regolamento 53/R che al PAI si è ritenuto corretto assegnare una probabilità di accadimento del fenomeno congiunto sormonto-rottura comunque maggiore rispetto a quella dell'evento idrologico che la determina in quanto non vi è la certezza del crollo arginale.

In tal modo le aree inondabili per crollo arginale per eventi con tempo di ritorno di 30 anni sono state classificate rispettivamente in I3 e in PIE mentre quelle relative a eventi con tempo di ritorno di 200 anni in I2.

6.5. Carta pericolosità idraulica

Le osservazioni emerse in sede di conferenza di servizi erano relative in modo particolare al non aver adeguatamente considerato la presenza degli edifici nella modellazione e al non aver inserito gli stessi, nella loro interezza, all'interno di una unica classi di pericolosità.

A tale proposito nella presente modellazione sono state variate le scabrezze del modello bidimensionale in modo da tenere conto della presenza degli edifici e del loro ostacolo al deflusso delle acque. In particolare è stata utilizzata una scabrezza K_s di Gauckler-Strickler pari a $20 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ per le superfici aperte e di $2 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ per gli edifici desunti dalla cartografia C.T.R. 1:2000 della Regione Toscana.

Nella fase di perimetrazione delle aree inondabili e della pericolosità idraulica è stato verificato che gli edifici ricadessero in una unica classe di pericolosità.

APPENDICE A

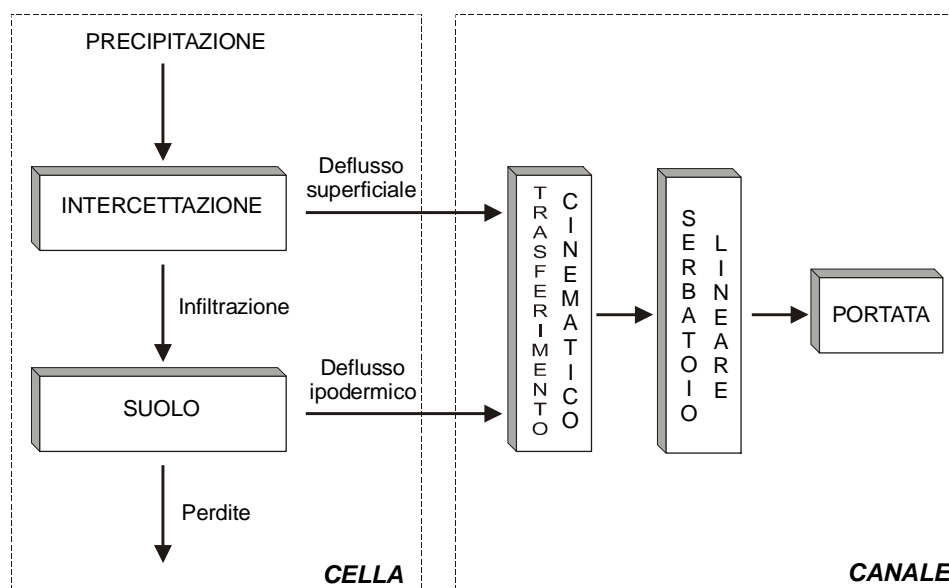
Il modello idrologico

Il modello idrologico

Il modello idrologico simula il processo di generazione e trasferimento dei deflussi attraverso la successione, per ciascuna cella e per tutti i passi temporali, delle seguenti fasi:

- *intercettazione*: in questa fase si effettua una stima della quantità di acqua che viene comunque sottratta al deflusso superficiale. La stima è riferita ad una componente iniziale che comprende le varie perdite per intercettazione (vegetazione, assorbimento del suolo) e ad una componente a regime riferita alla capacità di infiltrazione a saturazione.
- *suolo*: in questa fase si ricostruisce il bilancio idrologico del suolo, valutando la quantità d'acqua che va ad alimentare il volume profondo e la componente del deflusso ipodermico.
- *canale*: in questa fase si simula il trasferimento del deflusso superficiale e di quello ipodermico dalla singola cella alla sezione di chiusura.

Nella figura seguente si riporta uno schema del modello idrologico adottato.



Schema del modello afflussi-deflussi.

All'inizio dell'evento di precipitazione una parte della pioggia si infiltra nel suolo, fino a saturare la capacità di ritenuta del suolo. Saturato tale volume, l'acqua continua a infiltrare nel suolo con un tasso definito dalla velocità di infiltrazione. Se l'afflusso eccede la velocità di infiltrazione si ha deflusso superficiale verso il canale. Tale deflusso contribuisce alla portata con un ritardo dettato dal modello di trasferimento.

Il bilancio del serbatoio "suolo" tiene pertanto conto da una parte dell'afflusso per infiltrazione, dall'altra delle perdite. Le perdite sono tali che per suolo saturo la quantità di acqua che si infiltra nel suolo sia pari alla velocità di infiltrazione.

La capacità di ritenuta in [mm], ovvero la quantità di acqua che può essere immagazzinata nella parte gravitazionale del suolo (corrisponde al grado di saturazione uguale a 1) e la velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h] che rappresenta la velocità di infiltrazione nel suolo in condizioni di saturazione (grado di saturazione uguale a 1) sono definite dalle mappe *raster* relative. Per quanto riguarda il deflusso ipodermico si assume che esso sia funzione della velocità di filtrazione a saturazione moltiplicata per un fattore 1000.

Passando all'algoritmo di calcolo, con riferimento alle variabili elencate nella tabella 9 si riportano di seguito i principali calcoli effettuati dal programma per ciascuna cella costituente il bacino:

1 - l'afflusso sulla singola cella, P_{i_k} [mm/h];

2 - il suolo è assimilato a un serbatoio lineare che si riempie in ragione della precipitazione (di intensità costante sul passo di bilancio) e si svuota in ragione della percolazione, K_s [mm/h], e del deflusso ipodermico regolato dal parametro K [1/h].

3 - l'equazione di continuità, da cui si ricava il contenuto di acqua nel suolo da un passo a quello successivo, è esprimibile in forma differenziale nel seguente modo:

$$\Delta\theta = \theta_{k+1} - \theta_k = \left(P_i - K_s - K \cdot \frac{\theta_{k+1} + \theta_k}{2} \right) dt$$

$$\frac{\theta_{k+1}}{dt} + \frac{K}{2} \cdot \theta_{k+1} = \frac{\theta_k}{dt} - \frac{K}{2} \cdot \theta_k + P_i - K_s$$

$$\theta_{k+1} = \left(\frac{\left(\left(\frac{1}{dt} - \frac{K}{2} \right) \theta_k + P_{i_k} - K_s \right)}{\frac{1}{dt} + \frac{K}{2}} \right)$$

Il contenuto di acqua nel suolo all'inizio θ_0 [mm] è uguale a $\alpha_0 \theta_{\max}$, dove α_0 è il grado di saturazione iniziale. Il valore del contenuto di acqua nel suolo è limitato tra 0 e θ_{\max} , pertanto si possono distinguere tre casi:

- essiccamento del suolo:

se $\theta_k / dt + P_{i_k} > K_s$ allora

$$\theta_{k+1} = 0$$

$$Q_{1k} = \theta_k / dt + P_{i_k} - K_s$$

$$I_{\text{eff}} = K_s$$

altrimenti

$$\theta_{k+1} = 0$$

$$Q_{1k} = 0$$

$$I_{\text{eff}} = \theta_k / dt + P_{i_k}$$

- saturazione del suolo:

$$\theta_{k+1} = \theta_{\max}$$

$$Q_{1k} = (\theta_k - \theta_{\max}) / dt + P_{i_k} - K_s$$

$$I_{\text{eff}} = K_s$$

- caso intermedio:

$$0 < \theta_{k+1} < \theta_{\max}$$

$$Q_{1k} = (\theta_k - \theta_{k+1}) / dt + P_{i_k} - K_s$$

$$I_{\text{eff}} = K_s$$

4 - il modello di trasferimento nel reticolo è costituito da una componente di invaso e da una componente cinematica poste in serie. La componente di invaso è caratterizzata dalla seguente espressione:

$$\varphi_{k+1} = \left(\frac{\left(\frac{1}{dt} - \frac{C_s}{2} \right) \varphi_k + Q_{1k}}{\frac{1}{dt} + \frac{C_s}{2}} \right)$$

dove C_s [1/h] è il parametro del serbatoio calcolato come $1/\tau_i$ e φ_k il volume d'acqua nel reticolo (assunto inizialmente nullo). Il contributo verso la componente cinematica risulta:

$$Q_k = C_s \frac{\varphi_{k+1} + \varphi_k}{2}$$

5 - la componente cinematica trasla nel tempo il contributo Q_k di un fattore pari a τ_c .

Il contributo complessivo alla sezione di chiusura avviene attraverso la convoluzione dei contributi delle singole celle.

Sulla base di quanto esposto, il modello necessita della definizione dei seguenti parametri validi su tutto il bacino:

α_o = frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale) [/];

RI = coefficiente moltiplicativo del raster della capacità di ritenuta del suolo [/];

IN = coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione [/];

IP = coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica [/];

MT = coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento [/];

CI = coefficiente ripartizione cinematico-invaso [/].

Simbolo	Significato	unità di misura
P_{ik}	valore dell'afflusso (precipitazione) per la singola cella al passo k-esimo	[mm/h]
Δt	passo temporale	[h]
Dx	passo spaziale	[m]
SC	valore della capacità di ritenuta del suolo (storage capacity)	[mm]
KL	valore della velocità di infiltrazione a saturazione	[mm/h]
RI	coefficiente moltiplicativo della capacità di ritenuta del suolo	[/]
IN	coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione	[/]
IP	coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica	[/]
T	valore dei tempi di trasferimento	[h]
$T_{c=CI T}$	valore dei tempi di trasferimento o di risposta secondo lo schema cinematico	[h]
$T_{i=(1-CI) T/MT}$	valore dei tempi di trasferimento secondo lo schema di trasferimento di invaso	[h]
MT	coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento	[/]
CI	coefficiente ripartizione cinematico-invaso	[/]
$\theta_{max}=RI SC$	valore distribuito della capacità di ritenuta massima del suolo (volume utile del suolo)	[mm]
$K_s=IN KL$	valore distribuito della velocità di infiltrazione a saturazione (o permeabilità)	[mm/h]

$\tau_c = T_c/MT$	valore distribuito dei tempi di trasferimento secondo il metodo cinematico	[h]
$\tau_i = T_i/MT$	valore distribuito dei tempi di trasferimento secondo il metodo dell'invaso	[h]
$C_{s=1}/\tau_i$	valore distribuito della costante di esaurimento del serbatoio lineare	[1/h]
α_o	frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale)	[/]
θ_o	contenuto di acqua nel suolo nello stato iniziale	[mm]
$K=IP(KL/SC)$	coefficiente di deflusso ipodermico	[1/h]
θ_k	contenuto di acqua nel suolo al passo k-esimo	[mm]
l_{eff}	Infiltrazione effettiva	[mm/h]
Q_{1k}	contributo verso il reticolo al passo k-esimo	[mm/h]
Φ_k	volume d'acqua invasata nel reticolo	[mm]
Q_k	contributo alla foce passo k-esimo	[mm/h]

Elenco della variabili utilizzate dal modello afflussi-deflussi.

Le precipitazioni

L'input di precipitazione, in termini di ietogramma, può essere definito sulla base delle curve di possibilità pluviometrica (CPP) adottando un particolare ietogramma di intensità variabile, noto in letteratura scientifica come *ietogramma Chicago*. Lo ietogramma Chicago prevede la seguente formulazione per la parte antecedente e successiva al picco di intensità della precipitazione:

$$i(t) = n(aT^m) \left(\frac{t_b}{r} \right)^{n-1} \quad \text{per } t \leq t_p$$

$$i(t) = n(aT^m) \left(\frac{t_a}{(1-r)} \right)^{n-1} \quad \text{per } t > t_p$$

dove:

a, n, m parametri della CPP ($h = a d^n T^m$);

T tempo di ritorno (anni) prescelto per l'evento

t tempo dall'inizio dell'evento;

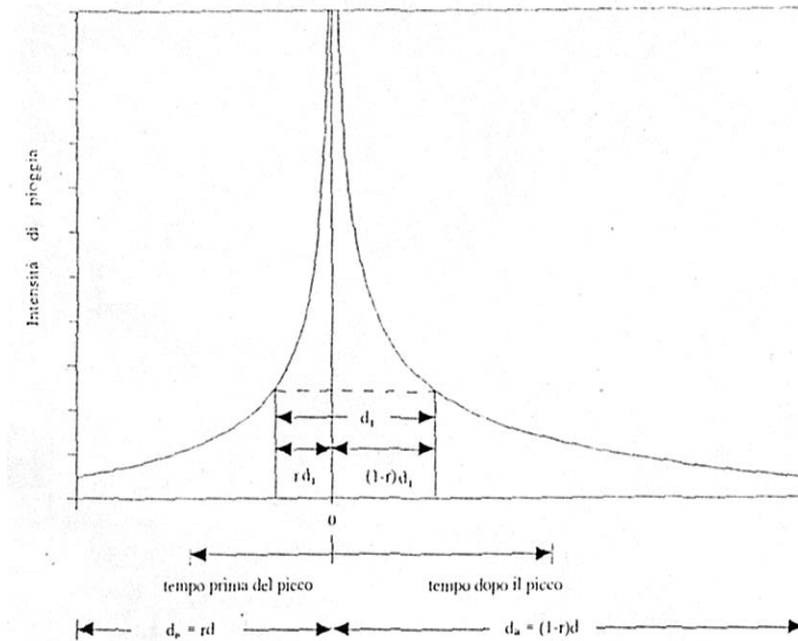
t_p tempo di picco;

t_b tempo mancante al verificarsi del picco;

t_a tempo trascorso dal verificarsi del picco;

d durata dell'evento;

r fattore di fase (determina la posizione temporale del picco)



Schema dello ietogramma Chicago

La particolarità di questo ietogramma (che è anche la sua comodità), è quello di racchiudere al suo interno, per tutte le durate minori di quella complessiva t_b , eventi congruenti con la CPP, e quindi di sollecitare sicuramente in modo critico il bacino di volta in volta considerato.

La variabilità spazio-temporale della precipitazione è messa in conto attraverso un *coefficiente di ragguaglio areale*, K_r , del tipo:

$$K_r = h_A(A, t) / h(t)$$

dove $h_A(A, t)$ è l'altezza di pioggia di durata t ragguagliata all'area A e $h(t)$ l'altezza di pioggia di durata t nel centro di scroscio.

Il valore di K_r dipende da tre fattori:

- l'estensione dell'area investita dalla precipitazione;
- la durata considerata;
- l'altezza di pioggia;

Per la quantificazione di K_r si è fatto riferimento alla formula dell'USWB.

$$K_r = 1 - \exp(-\alpha t^\beta) + \exp(-\alpha t^\beta - \gamma A)$$

dove α , β e γ sono i parametri della formula, t [h] la durata della precipitazione e A [kmq] l'area del bacino.

I parametri di default sono i seguenti

:

- $\alpha = 0.036 a$, dove a è il parametro della CPP;
- $\beta = 0.25$;

- $\gamma = 0.01$.

La applicazione del coefficiente di ragguaglio areale allo ietogramma di tipo Chicago è stata condotta applicando la formula separatamente a ciascun intervallo di tempo a cavallo del picco di pioggia in modo da modificare la forma dello ietogramma di progetto in funzione dell'area del bacino a cui questo viene applicato.

Una tale applicazione consente di modificare automaticamente la forma dello ietogramma in considerazione del fatto che le piogge ragguagliate per bacini piccoli mantengono alti valori di intensità che poi diminuiscono all'aumentare della dimensione del bacino fino a divenire assimilabili a precipitazioni di intensità costante per grandi bacini.

APPENDICE B

Il modello idraulico

Il modello idraulico

Il modello unidimensionale in moto vario

Il modello idraulico unidimensionale adottato si basa sulle classiche equazioni del moto e di continuità per una corrente, associate ad un'opportuna equazione per la stima delle dissipazioni energetiche sia a carattere concentrato sia di tipo distribuito.

Le equazioni, nella loro formulazione generale di De Saint Venant, esprimono le caratteristiche idrauliche (portata, carico piezometrico, altezza d'acqua, velocità) in funzione del tempo e dello spazio.

In generale, la risoluzione dello schema di moto vario viene ottenuta per via numerica, discretizzando le equazioni nel dominio spazio-temporale mediante opportuni schemi numerici. La soluzione viene pertanto ottenuta solo nei punti di discretizzazione (e non con continuità su tutto il dominio). Tali punti sono rappresentati dalle sezioni geometriche rilevate (*discretizzazione spaziale*) e dalla scansione temporale utilizzata nella rappresentazione dei fenomeni (*discretizzazione temporale*).

Il grado di risoluzione che si ottiene deriva quindi dalla densità delle sezioni rilevate e, per lo schema di moto vario, anche dal passo temporale adottato.

Le equazioni di moto vario sono state applicate per lo studio della propagazione delle onde di piena, ovvero per la stima delle condizioni idrometriche dei corsi d'acqua interessati da onde di piena.

Il modello di moto vario si basa sulle equazioni di continuità e di moto per una corrente liquida incomprimibile e unidirezionale in condizioni non stazionarie; tali equazioni risultano, rispettivamente:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} - J$$

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

in cui:

- A = area della sezione liquida [m²];
- Q = portata [m³/s];
- $q(x)$ = portata laterale (positiva se entrante) [m²/s];
- H = carico totale della corrente [m];
- g = accelerazione di gravità [m/s²];
- U = velocità media della corrente [m/s];
- J = perdite di carico effettivo per unità di lunghezza;
- x = ascissa corrente lungo l'alveo [m];
- t = tempo [s].

La perdita di carico effettivo può essere stimata con un'equazione analoga a quella adottata per il moto uniforme:

$$J = \frac{U|U|}{gC^2R}$$

ove, oltre ai simboli già noti, R è il raggio idraulico e C il coefficiente di resistenza esprimibile nella forma:

$$C = \frac{K_s R^{1/6}}{\sqrt{g}}$$

ove K_s [$m^{1/3}s^{-1}$] è il coefficiente dimensionale di Gauckler-Strickler.

Per includere nel modello gli effetti dissipativi indotti da variazioni di sezione, quali allargamenti o restringimenti, si sono valutate le perdite di carico effettivo addizionali, ΔH , mediante la formula:

$$\Delta H = \xi \Delta \left(\alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \right)$$

ove α è il coefficiente di ragguglio della energia cinetica e ξ può assumere valori compresi tra 0.1 e 0.9 maggiori nel caso di allargamento della sezione e minori nel caso di restringimento.

La risoluzione delle equazioni sopra descritte viene svolta per via numerica, discretizzandole opportunamente alle differenze finite, e associandovi appropriate condizioni al contorno.

Le equazioni ridotte in forma numerica sono in generale risolte in forma implicita approssimando alle differenze finite le derivate e operando una media pesata per gli altri termini. In particolare sono utilizzate le seguenti formulazioni:

$$A = p_s p_t A_i^k + p_s (1 - p_t) A_i^{k+1} + (1 - p_s) p_t A_{i+1}^k + (1 - p_s) (1 - p_t) A_{i+1}^{k+1}$$

$$\frac{\partial A}{\partial s} = p_t \frac{A_{i+1}^k - A_i^k}{\Delta s} + (1 - p_t) \frac{A_{i+1}^{k+1} - A_i^{k+1}}{\Delta s}$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = p_s \frac{A_i^{k+1} - A_i^k}{\Delta t} + (1 - p_s) \frac{A_{i+1}^{k+1} - A_{i+1}^k}{\Delta s}$$

dove p_s è il peso della media spaziale e p_t il peso della media temporale (l'indice k è riferito al tempo e l'indice i allo spazio). I valori utilizzati in genere per p_s e p_t sono rispettivamente di 0.5 e 0.45.

Il modello fornisce la risoluzione delle equazioni in corrispondenza dei nodi di una griglia spazio-temporale ove, in corrispondenza delle sezioni fluviali predefinite, al variare del tempo si ricavano i valori delle grandezze idrauliche (portata, velocità, carico piezometrico, etc). A ciascun passo il programma bilancia le equazioni di moto e di continuità in modo iterativo fino al raggiungimento di una correzione su portate e livelli inferiore a una soglia prefissata.

Nell'ipotesi di corrente lenta, le condizioni al contorno da imporre al sistema prima definito possono consistere nella attribuzione di una scala di deflusso nella sezione di chiusura di valle, del tipo:

$$Q = a(h - h_0)^c + q_0$$

dove a , b , c e q_0 sono i parametri della scala di deflusso, mentre nella sezione di monte si assegna un idrogramma di portata.

Come condizione di valle può essere assunto, inoltre, un livello idrometrico o una portata variabili nel tempo.

E' inoltre possibile inserire una portella nella simulazione che impedisce il rigurgito verso monte annullando la portata.

Nel caso di condizioni locali di corrente veloce, la profondità viene fissata sul valore critico. In particolare l'equazione di moto a valle della sezione viene sostituita dalla condizione di corrente critica nella sezione in esame.

Il modello delle casse di espansione

La simulazione del funzionamento delle casse di espansione è stata condotta associando al modello idraulico non stazionario il modello di inondazione della cassa che si basa sulle seguenti rappresentazioni:

– *caratterizzazione morfologica delle aree interne alla cassa di espansione*

In tale fase si è proceduto alla definizione delle caratteristiche plano-altimetriche delle casse di espansione sulla base della cartografia con l'obiettivo di ricavare la legge di riempimento quota-volume di inondazione in funzione dei livelli di piena nella forma:

$$V = A(y - y_0)^B$$

in cui y_0 è la quota minima del terreno all'interno dell'area.

– *definizione delle leggi di connessione idraulica cassa-fiume*

Sulla base delle caratteristiche delle casse di espansione considerate, sono state definite le leggi di connessioni idraulica che regolano il trasferimento dei volumi idrici alveo-fiume in entrambe le direzioni.

– Di norma, il trasferimento dei volumi idrici avviene attraverso soglia sfiorante fissa schematizzabile mediante la legge degli stramazzi in parete grossa, con possibilità di funzionamento bidirezionale, in condizioni di deflusso libero oppure rigurgitato in funzione dei livelli a monte e a valle dello stramazzo. La legge di deflusso adottata è la seguente:

$$Q_{sf} = l(\mu_1 h_2 - \mu_2 h_1) \sqrt{2gh_1}$$

dove l è la lunghezza della soglia, μ_1 e μ_2 sono pari rispettivamente a 0.65 e 0.4, h_1 e h_2 sono rispettivamente i livelli del pelo libero a monte e a valle, riferiti alla quota della soglia.

Con tale schema, il riempimento della cassa è regolato dalle caratteristiche dello sfioratore che, in funzione della quota e della lunghezza, influenza la velocità di riempimento della cassa stessa. Si trascurano in tal caso gli effetti della non stazionarietà e bidimensionalità connessi al fenomeno di propagazione del fronte di inondazione nella cassa.

Ad ogni passo temporale l'equazione di continuità impone il bilancio tra i volumi netti scambiati tra alveo e cassa, e la variazione di volume locale, sotto le ipotesi che il volume accumulato sia univocamente correlato all'altezza idrica nella cassa stessa, e che le portate scambiate siano funzione univoca dei livelli a monte e a valle delle connessioni idrauliche.

In particolare, l'equazione di continuità per la generica cassa k -esima risulta la seguente:

$$A_{ck} \frac{\partial h_k}{\partial t} = \sum_i Q_{ki}(h_k, h_i)$$

ove A_{ck} rappresenta la superficie allagata nella cassa k -esima, h_k è l'altezza d'acqua relativa, Q_{ki} è la portata scambiata con la eventuale cassa i -esima adiacente in funzione delle relative altezze idriche e la sommatoria è estesa a tutte le aree in comunicazione diretta con l'area k -esima.

Qualora siano presenti organi di sfioro diversi dalla soglia fissa sopra descritta, saranno illustrate caso per caso le schematizzazioni adottate.

Il modello bidimensionale di inondazione

La risoluzione dello schema di inondazione bidimensionale è ottenuta mediante la risoluzione di un sistema alle derivate parziali, di tipo iperbolico, non lineare, costituito dalle equazioni complete di De Saint Venant scritte in forma bidimensionale.

Le equazioni di continuità e del moto nelle due direzioni possono essere scritte come segue:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \tau_x = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \tau_y = 0$$

in cui:

- x = coordinata longitudinale;
- y = coordinata trasversale;
- t = coordinata temporale;
- h = altezza d'acqua;
- u = componente di velocità nella direzione x;
- v = componente di velocità nella direzione y;
- M = uh = flusso della corrente in direzione x;
- N = vh = flusso della corrente in direzione y;
- h = altezza d'acqua;
- H = quota della superficie libera;
- ρ = densità dell'acqua;
- τ_x = sforzo tangenziale al fondo nella direzione x;
- τ_y = sforzo tangenziale al fondo nella direzione y.

In particolare, gli sforzi tangenziali lungo x e y sono stati valutati nel modo seguente:

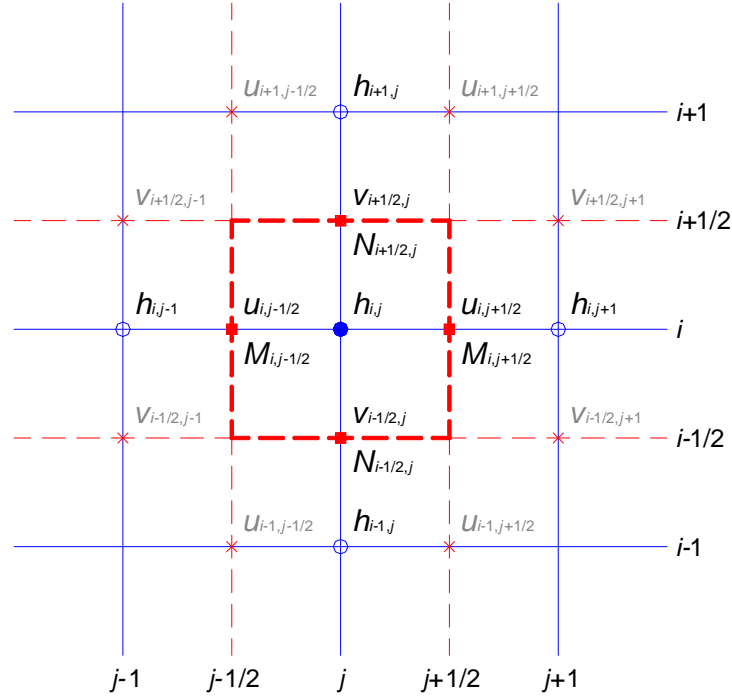
$$\tau_x = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

$$\tau_y = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

avendo indicato con n il coefficiente di scabrezza di Manning.

La risoluzione delle equazioni sopra scritte viene svolta numericamente mediante uno schema alle differenze finite di tipo implicito accoppiato ad appropriate condizioni al contorno. In particolare,

facendo riferimento allo schema della figura seguente, sono state utilizzate le seguenti formulazioni nell'equazione di continuità:

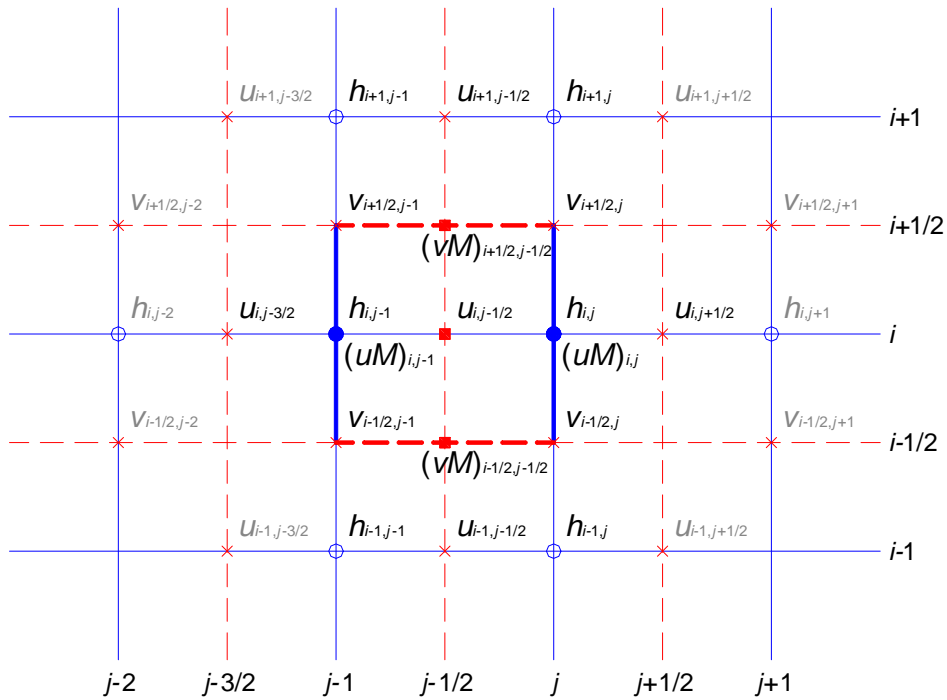


$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k}{\Delta t} \\ \frac{\partial M}{\partial x} = p_t \left(\frac{M_{i,j+1/2}^k - M_{i,j-1/2}^k}{\Delta x} \right) + (1-p_t) \left(\frac{M_{i,j+1/2}^{k+1} - M_{i,j-1/2}^{k+1}}{\Delta x} \right) \\ \frac{\partial N}{\partial y} = p_t \left(\frac{N_{i+1/2,j}^k - N_{i-1/2,j}^k}{\Delta y} \right) + (1-p_t) \left(\frac{N_{i+1/2,j}^{k+1} - N_{i-1/2,j}^{k+1}}{\Delta y} \right) \end{array} \right.$$

in cui:

$$\begin{aligned} M_{i,j-1/2}^k &= u_{i,j-1/2}^k [\rho_s h_{i,j}^k + (1-\rho_s) h_{i,j-1}^k]; & N_{i-1/2,j}^k &= v_{i-1/2,j}^k [\rho_s h_{i,j}^k + (1-\rho_s) h_{i-1,j}^k]; \\ M_{i,j+1/2}^k &= u_{i,j+1/2}^k [\rho_s h_{i,j+1}^k + (1-\rho_s) h_{i,j}^k]; & N_{i+1/2,j}^k &= v_{i+1/2,j}^k [\rho_s h_{i+1,j}^k + (1-\rho_s) h_{i,j}^k]; \\ M_{i,j-1/2}^{k+1} &= u_{i,j-1/2}^{k+1} [\rho_s h_{i,j}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i,j-1}^{k+1}]; & N_{i-1/2,j}^{k+1} &= v_{i-1/2,j}^{k+1} [\rho_s h_{i,j}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i-1,j}^{k+1}]; \\ M_{i,j+1/2}^{k+1} &= u_{i,j+1/2}^{k+1} [\rho_s h_{i,j+1}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i,j}^{k+1}]; & N_{i+1/2,j}^{k+1} &= v_{i+1/2,j}^{k+1} [\rho_s h_{i+1,j}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i,j}^{k+1}]. \end{aligned}$$

Mentre, facendo riferimento allo schema della figura seguente, sono state utilizzate le seguenti formulazioni nell'equazione del moto nella direzione x:



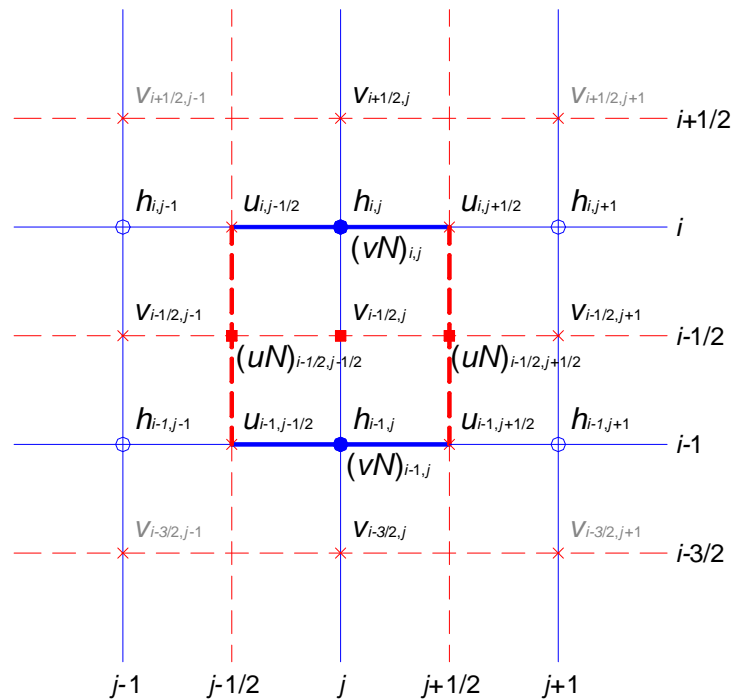
$$\left\{ \begin{aligned}
\frac{\partial M}{\partial t} &= \frac{M_{i,j}^{k+1} - M_{i,j}^k}{\Delta t} = \frac{(uh)_{i,j}^{k+1} - (uh)_{i,j}^k}{\Delta t} \\
\frac{\partial(uM)}{\partial x} &= \rho_t \left(\frac{(uM)_{i,j}^k - (uM)_{i,j-1}^k}{\Delta x} \right) + (1 - \rho_t) \left(\frac{(uM)_{i,j}^{k+1} - (uM)_{i,j-1}^{k+1}}{\Delta x} \right) \\
\frac{\partial(vM)}{\partial y} &= \rho_t \left(\frac{(vM)_{i+1/2,j-1/2}^k - (vM)_{i-1/2,j-1/2}^k}{\Delta y} \right) + (1 - \rho_t) \left(\frac{(vM)_{i+1/2,j-1/2}^{k+1} - (vM)_{i-1/2,j-1/2}^{k+1}}{\Delta y} \right) \\
gh \frac{\partial H}{\partial x} &= g \left[\rho_t (\rho_s h_{i,j-1}^k + (1 - \rho_s) h_{i,j}^k) + (1 - \rho_t) (\rho_s h_{i,j-1}^{k+1} + (1 - \rho_s) h_{i,j}^{k+1}) \right] \cdot \\
&\quad \cdot \left[\rho_t \left(\frac{H_{i,j}^k - H_{i,j-1}^k}{\Delta x} \right) + (1 - \rho_t) \left(\frac{H_{i,j}^{k+1} - H_{i,j-1}^{k+1}}{\Delta x} \right) \right] \\
\frac{1}{\rho} \tau_x &= gn^2 (\rho_t u_{i,j-1/2}^{k+1} + (1 - \rho_t) u_{i,j-1/2}^k) \cdot \left[\rho_t (\rho_s h_{i,j-1}^k + (1 - \rho_s) h_{i,j}^k) + (1 - \rho_t) (\rho_s h_{i,j-1}^{k+1} + (1 - \rho_s) h_{i,j}^{k+1}) \right]^{-1/3} \cdot \\
&\quad \cdot \left\langle (\rho_t u_{i,j-1/2}^k + (1 - \rho_t) u_{i,j-1/2}^{k+1})^2 + \left\{ \rho_t [\rho_s (\rho_s v_{i-1/2,j-1}^k + (1 - \rho_s) v_{i-1/2,j}^k) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + (1 - \rho_s) (\rho_s v_{i+1/2,j-1}^k + (1 - \rho_s) v_{i+1/2,j}^k)] + (1 - \rho_t) [\rho_s (\rho_s v_{i-1/2,j-1}^{k+1} + (1 - \rho_s) v_{i-1/2,j}^{k+1}) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + (1 - \rho_s) (\rho_s v_{i+1/2,j-1}^{k+1} + (1 - \rho_s) v_{i+1/2,j}^{k+1})] \right\}^{1/2} \right\rangle
\end{aligned} \right.$$

in cui:

$$\begin{aligned}
(uM)_{i,j-1}^k &= [\rho_s u_{i,j-3/2}^k \cdot u_{i,j-3/2}^k + (1 - \rho_s) u_{i,j-1/2}^k \cdot u_{i,j-1/2}^k] h_{i,j-1}^k ; \\
(uM)_{i,j}^k &= [\rho_s u_{i,j-1/2}^k \cdot u_{i,j-1/2}^k + (1 - \rho_s) u_{i,j+1/2}^k \cdot u_{i,j+1/2}^k] h_{i,j}^k ; \\
(uM)_{i,j-1}^{k+1} &= [\rho_s u_{i,j-3/2}^{k+1} \cdot u_{i,j-3/2}^{k+1} + (1 - \rho_s) u_{i,j-1/2}^{k+1} \cdot u_{i,j-1/2}^{k+1}] h_{i,j-1}^{k+1} ; \\
(uM)_{i,j}^{k+1} &= [\rho_s u_{i,j-1/2}^{k+1} \cdot u_{i,j-1/2}^{k+1} + (1 - \rho_s) u_{i,j+1/2}^{k+1} \cdot u_{i,j+1/2}^{k+1}] h_{i,j}^{k+1} ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (vM)_{i-1/2,j-1/2}^k &= \left[(\rho_s v_{i-1/2,j-1}^k + (1-\rho_s) v_{i-1/2,j}^k) \cdot (\rho_s u_{i-1,j-1/2}^k + (1-\rho_s) u_{i,j-1/2}^k) \right] \\
 &\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i-1,j-1}^k + (1-\rho_s) h_{i-1,j}^k) + (1-\rho_s) (\rho_s h_{i,j-1}^k + (1-\rho_s) h_{i,j}^k) \right]; \\
 (vM)_{i+1/2,j-1/2}^k &= \left[(\rho_s v_{i+1/2,j-1}^k + (1-\rho_s) v_{i+1/2,j}^k) \cdot (\rho_s u_{i,j-1/2}^k + (1-\rho_s) u_{i+1,j-1/2}^k) \right] \\
 &\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i,j-1}^k + (1-\rho_s) h_{i,j}^k) + (1-\rho_s) (\rho_s h_{i+1,j-1}^k + (1-\rho_s) h_{i+1,j}^k) \right]; \\
 (vM)_{i-1/2,j-1/2}^{k+1} &= \left[(\rho_s v_{i-1/2,j-1}^{k+1} + (1-\rho_s) v_{i-1/2,j}^{k+1}) \cdot (\rho_s u_{i-1,j-1/2}^{k+1} + (1-\rho_s) u_{i,j-1/2}^{k+1}) \right] \\
 &\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i-1,j-1}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i-1,j}^{k+1}) + (1-\rho_s) (\rho_s h_{i,j-1}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i,j}^{k+1}) \right]; \\
 (vM)_{i+1/2,j-1/2}^{k+1} &= \left[(\rho_s v_{i+1/2,j-1}^{k+1} + (1-\rho_s) v_{i+1/2,j}^{k+1}) \cdot (\rho_s u_{i,j-1/2}^{k+1} + (1-\rho_s) u_{i+1,j-1/2}^{k+1}) \right] \\
 &\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i,j-1}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i,j}^{k+1}) + (1-\rho_s) (\rho_s h_{i+1,j-1}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i+1,j}^{k+1}) \right].
 \end{aligned}$$

Infine, facendo riferimento allo schema della figura seguente sono state utilizzate le seguenti formulazioni nell'equazione del moto nella direzione y:



$$\left\{ \begin{aligned}
\frac{\partial N}{\partial t} &= \frac{N_{i,j}^{k+1} - N_{i,j}^k}{\Delta t} = \frac{(vh)_{i,j}^{k+1} - (vh)_{i,j}^k}{\Delta t} \\
\frac{\partial(uN)}{\partial x} &= \rho_t \left(\frac{(uN)_{i-1/2,j+1/2}^k - (uN)_{i-1/2,j-1/2}^k}{\Delta x} \right) + (1 - \rho_t) \left(\frac{(uN)_{i-1/2,j+1/2}^{k+1} - (uN)_{i-1/2,j-1/2}^{k+1}}{\Delta x} \right) \\
\frac{\partial(vN)}{\partial y} &= \rho_t \left(\frac{(vN)_{i,j}^k - (vN)_{i-1,j}^k}{\Delta y} \right) + (1 - \rho_t) \left(\frac{(vN)_{i,j}^{k+1} - (vN)_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta y} \right) \\
gh \frac{\partial H}{\partial y} &= g \left[\rho_t (\rho_s h_{i-1,j}^k + (1 - \rho_s) h_{i,j}^k) + (1 - \rho_t) (\rho_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1 - \rho_s) h_{i,j}^{k+1}) \right] \cdot \\
&\quad \cdot \left[\rho_t \left(\frac{H_{i,j}^k - H_{i-1,j}^k}{\Delta y} \right) + (1 - \rho_t) \left(\frac{H_{i,j}^{k+1} - H_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta y} \right) \right] \\
\frac{1}{\rho} \tau_y &= gn^2 (\rho_t v_{i-1/2,j}^{k+1} + (1 - \rho_t) v_{i-1/2,j}^k) \cdot \left[\rho_t (\rho_s h_{i-1,j}^k + (1 - \rho_s) h_{i,j}^k) + (1 - \rho_t) (\rho_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1 - \rho_s) h_{i,j}^{k+1}) \right]^{-1/3} \cdot \\
&\quad \cdot \left\{ \rho_t \left[\rho_s (\rho_s u_{i-1,j-1/2}^k + (1 - \rho_s) u_{i,j-1/2}^k) + (1 - \rho_s) (\rho_s u_{i-1,j+1/2}^k + (1 - \rho_s) u_{i,j+1/2}^k) \right] + \right. \\
&\quad \left. + (1 - \rho_t) \left[\rho_s (\rho_s u_{i-1,j-1/2}^{k+1} + (1 - \rho_s) u_{i,j-1/2}^{k+1}) + (1 - \rho_s) (\rho_s u_{i-1,j+1/2}^{k+1} + (1 - \rho_s) u_{i,j+1/2}^{k+1}) \right] \right\}^2 + \\
&\quad \left. + (\rho_t v_{i-1/2,j}^k + (1 - \rho_t) v_{i-1/2,j}^{k+1})^2 \right\}^{1/2}
\end{aligned} \right.$$

in cui:

$$\begin{aligned}
(uN)_{i-1/2,j-1/2}^k &= \left[(\rho_s v_{i-1/2,j-1}^k + (1 - \rho_s) v_{i-1/2,j}^k) \cdot (\rho_s u_{i-1,j-1/2}^k + (1 - \rho_s) u_{i,j-1/2}^k) \right] \cdot \\
&\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i-1,j-1}^k + (1 - \rho_s) h_{i,j-1}^k) + (1 - \rho_s) (\rho_s h_{i-1,j}^k + (1 - \rho_s) h_{i,j}^k) \right]; \\
(uN)_{i-1/2,j+1/2}^k &= \left[(\rho_s v_{i-1/2,j}^k + (1 - \rho_s) v_{i-1/2,j+1}^k) \cdot (\rho_s u_{i-1,j+1/2}^k + (1 - \rho_s) u_{i,j+1/2}^k) \right] \\
&\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i-1,j}^k + (1 - \rho_s) h_{i,j}^k) + (1 - \rho_s) (\rho_s h_{i-1,j+1}^k + (1 - \rho_s) h_{i,j+1}^k) \right]; \\
(uN)_{i-1/2,j-1/2}^{k+1} &= \left[(\rho_s v_{i-1/2,j-1}^{k+1} + (1 - \rho_s) v_{i-1/2,j}^{k+1}) \cdot (\rho_s u_{i-1,j-1/2}^{k+1} + (1 - \rho_s) u_{i,j-1/2}^{k+1}) \right] \\
&\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i-1,j-1}^{k+1} + (1 - \rho_s) h_{i,j-1}^{k+1}) + (1 - \rho_s) (\rho_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1 - \rho_s) h_{i,j}^{k+1}) \right]; \\
(uN)_{i-1/2,j+1/2}^{k+1} &= \left[(\rho_s v_{i-1/2,j}^{k+1} + (1 - \rho_s) v_{i-1/2,j+1}^{k+1}) \cdot (\rho_s u_{i-1,j+1/2}^{k+1} + (1 - \rho_s) u_{i,j+1/2}^{k+1}) \right] \\
&\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1 - \rho_s) h_{i,j}^{k+1}) + (1 - \rho_s) (\rho_s h_{i-1,j+1}^{k+1} + (1 - \rho_s) h_{i,j+1}^{k+1}) \right].
\end{aligned}$$

$$(vN)_{i,j-1}^k = [\rho_s v_{i-3/2,j}^k \cdot v_{i-3/2,j}^k + (1 - \rho_s) v_{i-1/2,j}^k \cdot v_{i-1/2,j}^k] h_{i,j-1}^k ;$$

$$(vN)_{i,j}^k = [\rho_s v_{i-1/2,j}^k \cdot v_{i-1/2,j}^k + (1 - \rho_s) v_{i+1/2,j}^k \cdot v_{i+1/2,j}^k] h_{i,j}^k ;$$

$$(vN)_{i,j-1}^{k+1} = [\rho_s v_{i-3/2,j}^{k+1} \cdot v_{i-3/2,j}^{k+1} + (1 - \rho_s) v_{i-1/2,j}^{k+1} \cdot v_{i-1/2,j}^{k+1}] h_{i,j-1}^{k+1} ;$$

$$(vN)_{i,j}^{k+1} = [\rho_s v_{i-1/2,j}^{k+1} \cdot v_{i-1/2,j}^{k+1} + (1 - \rho_s) v_{i+1/2,j}^{k+1} \cdot v_{i+1/2,j}^{k+1}] h_{i,j}^{k+1} ;$$

dove ρ_s è il peso della media spaziale e ρ_t il peso della media temporale (l'indice k è riferito al tempo, mentre gli indici i e j sono riferiti rispettivamente alle coordinate lungo x e y). I valori utilizzati per ρ_s e ρ_t sono rispettivamente di 0.5 e 0.45 che dalle prove effettuate risultano essere i più affidabili per la risoluzione del sistema.

Il modello fornisce la risoluzione delle equazioni in corrispondenza dei nodi di una griglia spazio-temporale ove, al variare del tempo, si ricavano i valori delle grandezze idrauliche (portata, velocità, carico piezometrico, etc). A ciascun passo il programma bilancia le equazioni di moto e di continuità in modo iterativo fino al raggiungimento di una correzione su portate e livelli inferiore a una soglia prefissata.

Il modello consente la verifica unicamente in condizioni di corrente lenta ($Fr < 1$).