

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e
delle Infrastrutture (DIATI)

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Idraulica



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

Modellazione idraulica della rete di drenaggio urbano della città di Torino

Caso studio di un bacino idrografico della città

Relatori:

Prof. Fulvio Boano
Prof. Luca Ridolfi

Candidato:

Paolo Marino

Correlatore:

Ing. Federico Raviola

Abstract

Il seguente lavoro nasce dal frutto di una collaborazione avviata tra la SMAT, acronimo di Società Metropolitana Acque Torino e il DIATI, acronimo di dipartimento di ingegneria dell'ambiente, del territorio e delle infrastrutture del Politecnico di Torino.

In particolare, le due parti in questione hanno deciso di esaminare i problemi della rete di drenaggio urbano nel comune di Torino a seguito di eventi eccezionali di pioggia. Per fare ciò, il DIATI ha ritenuto opportuno modellare la rete fognaria di Torino utilizzando il software «SWMM», in modo da evidenziare quali sono i punti critici e verificarne un effettivo riscontro con la realtà. Una volta individuati quali sono i collettori critici che provocano delle esondazioni con conseguenti allagamenti del piano campagna, si prova a trovare delle soluzioni plausibili che possano comportare un miglioramento della rete stessa.

Con questa tesi di laurea magistrale si studia un particolare bacino idrografico della città di Torino considerato a forte rischio idrogeologico, nei quartieri Parella e Campidoglio, caratterizzati dalla presenza del Parco della Pellerina, del fiume Dora Riparia e da alcuni corsi principali della città quali: Corso Regina Margherita, Corso Francia, Corso Lecce, Corso Svizzera, Corso Appio Claudio, Corso Montegrappa, Corso Telesio e Corso Potenza.



Ringraziamenti

Il presente lavoro sancisce la fine di un percorso che rimarrà indelebile per tutta la vita.

In primis vorrei ringraziare i miei genitori. Dal giorno in cui sono partito per diventare uno studente fuorisede fino ad oggi, mi hanno sempre supportato, anche in momenti in cui sembrava andare tutto storto. Se oggi sono qui a scrivere queste parole, il merito è soprattutto loro.

Grazie a mio fratello Nanni per la stima che ha sempre avuto nei miei confronti. Durante questi anni abbiamo condiviso tanti momenti di sport a Torino, dal calcio al tennis. Questo per me è stato molto importante.

Ringrazio Ilaria, la mia fidanzata. Ha sempre creduto in me e mi ha sempre spronato a fare e dare di più. È stata più volte la mia ancora mentre il mare era in tempesta. Una grossa fetta di questo traguardo è sicuramente anche sua.

Un ringraziamento particolare va al prof. Boano, al prof. Ridolfi e all'ing. Federico Raviola per avermi dato l'opportunità di sviluppare una tesi di laurea molto stimolante dal punto di vista professionale e per il loro continuo supporto durante i momenti di difficoltà.

Un pensiero va sicuramente ad Alessandro, il mio coinquilino. Ne abbiamo passate tante insieme e sicuramente ci siamo spronati a vicenda nel dare sempre di più.

Ringrazio tutti i miei più cari colleghi: Calogero, Alessandro, Riccardo, Fabio, Enzo, Salvo, Angelo, Gabriele e Bartolomeo. Definirli colleghi è troppo riduttivo, ho trovato delle amicizie che rimarranno per tutta la vita.

Colgo l'occasione per ringraziare tutti i miei più cari amici. Ringrazio in particolare i miei amici torinesi che in questi anni mi ha fatto svagare in tanti momenti in cui andava staccata la spina e perché mi hanno accolto come un fratello, facendomi sentire sin da subito a casa. Grazie a tutti i miei amici di Marsala e Petrosino, che mi sono sempre stati vicini e con cui ho sempre condiviso un'amicizia che ci lega da tanto tempo.

In ultimo, ma non per importanza, un saluto e un ringraziamento alle mie due nonne: nonna Carmela e nonna Rosa e a tutti i vari componenti della mia famiglia che hanno sempre creduto in me.

Chiudo con un ringraziamento un po' diverso: grazie alla città di Torino. Quando sei siciliano e parti per il fatidico settentrione, le aspettative iniziali sono sempre un po' scettiche. Invece qui ho trovato una seconda casa, una città bellissima, aperta al mondo, con gente meravigliosa e luoghi incantevoli che mi hanno fatto "ammortizzare" la nostalgia di casa.



“Non fermatevi là dove siete arrivati.”

(Pitagora)

INDICE

INTRODUZIONE	1
Capitolo I.....	4
IL DRENAGGIO URBANO	4
1.1. <i>Il drenaggio nelle aree urbane</i>	4
1.2. <i>Definizione di rete di drenaggio urbano.....</i>	6
1.3. <i>Condizioni di funzionamento delle reti fognarie.....</i>	11
1.4. <i>Dimensionamento delle reti fognarie</i>	13
1.4.1. <i>Dimensionamento rete bianca-trasformazione afflussi/deflussi</i>	14
1.4.2. <i>Metodi per il dimensionamento delle reti bianche.....</i>	17
1. <i>Metodo della corrivazione</i>	17
2. <i>Metodo dell'invaso lineare</i>	20
3. <i>Metodo italiano dell'invaso lineare</i>	24
Capitolo II.....	25
ANALISI DEL BACINO OGGETTO DI STUDIO	25
2.1. <i>Descrizione dell'area oggetto dello studio</i>	25
2.1.1. <i>Inquadramento</i>	25
2.1.2. <i>Criticità dell'area.....</i>	29
2.2. <i>Analisi morfologica dell'area.....</i>	30
2.2.1. <i>Suddivisione in bacini idrografici</i>	32
2.3. <i>Struttura della rete.....</i>	33
2.3.1. <i>Collettori</i>	33
2.3.2. <i>Pozzetti.....</i>	38
2.3.3. <i>Punti di sfocio</i>	39
2.4. <i>Precipitazioni</i>	40
2.4.1. <i>Precipitazioni a grande scala.....</i>	40
2.4.2. <i>Precipitazioni a scala di bacino</i>	43
Capitolo III.....	47
MODELLAZIONE DELLA RETE CON IL SOFTWARE SWMM	47
3.1. <i>Descrizione del software.....</i>	47

3.1.1.	<i>Genesi del codice</i>	47
3.1.2.	<i>Modello concettuale</i>	48
3.1.3.	<i>Descrizione dei moduli di SWMM</i>	50
3.1.3.1.	<i>Modulo idrologico</i>	52
3.1.3.2.	<i>Modulo idraulico</i>	53
3.1.3.3.	<i>Modulo di qualità</i>	56
3.1.4.	<i>Infiltrazione</i>	57
3.1.4.1.	<i>Metodo di Horton</i>	60
3.1.4.2.	<i>Metodo di Horton modificato</i>	61
3.2.	<i>Modellazione della rete</i>	63
3.2.1.	<i>Suddivisione in sottobacini</i>	63
3.2.2.	<i>Modello di infiltrazione</i>	66
3.2.3.	<i>Calcolo del grado di impermeabilità</i>	66
3.2.4.	<i>Depression Storage</i>	68
3.2.5.	<i>Calcolo della larghezza equivalente</i>	69
3.2.6.	<i>Equazioni risolventi</i>	70
3.2.7.	<i>Tempi di simulazione</i>	71
3.2.8.	<i>Condizioni al contorno</i>	71
3.3.	<i>Conversione con script Matlab</i>	71
3.3.1.	<i>Script per l'importazione della rete</i>	72
3.3.2.	<i>Script per l'importazione dei sottobacini</i>	73
3.3.4.	<i>Modello definitivo SWMM</i>	78
	Capitolo IV	79
	RISULTATI DEL MODELLO	79
4.1.	<i>Simulazione con tempo di pioggia 1h</i>	79
4.2.	<i>Simulazione con tempo di pioggia 10 minuti</i>	80
4.3.	<i>Analisi di sensitività sul modello di infiltrazione</i>	86
4.3.1.	<i>Risposta della rete per la pioggia di durata 1h</i>	87
4.3.2.	<i>Risposta della rete per la pioggia di durata 10min</i>	88
4.4.	<i>Simulazione eventi reali di pioggia</i>	89
4.4.1.	<i>Evento del 31/08/2021</i>	90
4.4.1.2.	<i>Risposta della rete</i>	91

4.4.2.	<i>Evento del 19/09/2021</i>	92
4.4.2.2.	<i>Risposta della rete</i>	93
Capitolo V.....		95
IDENTIFICAZIONE DELLE PROBLEMATICHE E POSSIBILI SOLUZIONI.....		95
5.1.	<i>Identificazione punti di intervento.....</i>	95
5.2.	<i>Pioggia di progetto.....</i>	96
5.3.	<i>Possibili interventi.....</i>	98
5.3.1.	<i>Interventi in zona 2 – Area Spettacoli.....</i>	98
5.3.1.1.	<i>Situazione pre - intervento.....</i>	98
5.3.1.2.	<i>Situazione post - intervento.....</i>	99
5.3.2.	<i>Interventi in zona 1 – Via Boselli.....</i>	101
5.3.2.1.	<i>Situazione pre - intervento.....</i>	101
5.3.2.2.	<i>Situazione post - intervento.....</i>	101
5.3.3.	<i>Considerazioni finali.....</i>	103
Conclusioni.....		104
Bibliografia e sitografia.....		106

INDICE DELLE FIGURE

<i>FIGURA 1: ESEMPIO DI RIGURGITO DI UNA FOGNATURA [4]</i>	4
<i>FIGURA 2: TABELLA RAFFIGURATIVA I TEMPI DI RITORNO DEI CONDOTTI FOGNARI [17]</i>	5
<i>FIGURA 3: ESEMPIO DI UN POZZETTO [1]</i>	6
<i>FIGURA 4: DIFFERENZA TRA UNA FOGNATURA MISTA E UNA FOGNATURA SEPARATA [7]</i>	9
<i>FIGURA 5: COLLETTORE IN CLS [18]</i>	9
<i>FIGURA 6: COLLETTORE IN PVC [22]</i>	9
<i>FIGURA 7: ESEMPIO DI CADITOIA A GRIGLIA [10]</i>	11
<i>FIGURA 8: GRADO DI RIEMPIMENTO DI UN COLLETTORE [22]</i>	11
<i>FIGURA 9: ESEMPIO DI CURVA DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA CPP [11]</i>	14
<i>FIGURA 10: SCHEMA DI PIOGGIA NETTA [8]</i>	15
<i>FIGURA 11: ESEMPIO DI UNA PDF (IN ROSSO) E DI UNA CDF (IN BLU) [15]</i>	18
<i>FIGURA 12: IETOGRAMMA COSTANTE [6]</i>	18
<i>FIGURA 13: MODELLO DELL'INVASO LINEARE, SERBATOIO CON LUCE DI FONDO [5]</i>	20
<i>FIGURA 14: RELAZIONE TRA PORTATA E TEMPO NEL METODO DELL'INVASO LINEARE [5]</i>	22
<i>FIGURA 15: MAPPA DELLA SUDDIVISIONE PARZIALE DELLA RETE DI DRENAGGIO DELLA CITTÀ DI TORINO IN BACINI AI FINI DELLA MODELLAZIONE NUMERICA</i>	25
<i>FIGURA 16: INQUADRAMENTO DEL BACINO M, CON ANNESSA CARTOGRAFIA DEL COMUNE DI TORINO</i>	26
<i>FIGURA 17: BACINO OGGETTO DI ANALISI</i>	27
<i>FIGURA 18: PARCO DELLA PELLERINA E DORA RIPARIA [23]</i>	28
<i>FIGURA 19: MAPPA DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO DELLA CITTÀ DI TORINO [20], IN ROSSO SI HA UNA FREQUENZA ELEVATA DI ALLAGAMENTI, IN ARANCIONE UNA FREQUENZA MODERATA DI ALLAGAMENTI</i>	29
<i>FIGURA 20: UN ESEMPIO DI CONFRONTO TRA DSM E DTM [13]</i>	31
<i>FIGURA 21: SUDDIVISIONE DELL'AREA IN BACINI IDROGRAFICI</i>	32
<i>FIGURA 22: PLANIMETRIA DEI COLLETTORI</i>	33
<i>FIGURA 23: SEZIONE DI UN COLLETTORE CON GEOMETRIA 600X900</i>	35
<i>FIGURA 24: SEZIONE DI UN COLLETTORE CON GEOMETRIA 700X1200</i>	35
<i>FIGURA 25: STRUTTURA DELLA RETE NEL BACINO ANALIZZATO</i>	36
<i>FIGURA 26: VISTA AEREA DEL CANALE DELLA PELLERINA [29]</i>	37
<i>FIGURA 27: PLANIMETRIA DEI POZZETTI</i>	38
<i>FIGURA 28: PUNTI DI SFOCIO DEL BACINO</i>	39
<i>FIGURA 29: ATLANTE DELLE PIOGGE INTENSE [14]</i>	40
<i>FIGURA 30: CARTA DELLE PRECIPITAZIONI PER LA CITTÀ DI TORINO CON UNA PIOGGIA DI DURATA 1 ORA</i>	41
<i>FIGURA 31: CARTA DELLE PRECIPITAZIONI PER LA CITTÀ DI TORINO CON UNA PIOGGIA DI DURATA 10 MINUTI</i>	41
<i>FIGURA 32: CPP DI UNA SINGOLA CELLA DELL'ATLANTE [14]</i>	42
<i>FIGURA 33: CARTA DELLE PRECIPITAZIONI A SCALA DI BACINO PER LA PIOGGIA DI DURATA 1 ORA</i>	43
<i>FIGURA 34: IETOGRAMMA COSTANTE PER PIOGGIA DI DURATA 1 ORA</i>	44
<i>FIGURA 35: CARTA DELLE PRECIPITAZIONI A SCALA DI BACINO PER LA PIOGGIA DI DURATA 10 MINUTI</i>	45

FIGURA 36: IETOGRAMMA COSTANTE PER PIOGGIA DI DURATA 10 MINUTI	46
FIGURA 37: CONCETTUALIZZAZIONE DI SWMM [2]	49
FIGURA 38: INTERFACCIA DI SWMM	50
FIGURA 39: I MODULI DI SWMM [3]	51
FIGURA 40: GEOMETRIA DELLE CONDOTTE SU SWMM [19]	55
FIGURA 41: IL MODELLO ADOTTATO DA SWMM PER UN SISTEMA DI DRENAGGIO [19]	57
FIGURA 42: SEPARAZIONE TRA INFILTRAZIONE E RUSCELLAMENTO [52]	58
FIGURA 43: CLASSIFICAZIONE DEI GRUPPI IDRICI DEL SUOLO [12]	59
FIGURA 44: GRAFICO RAPPRESENTANTE IL METODO DI HORTON [24]	61
FIGURA 45: ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL METODO DEI TOPOIETI [9]	64
FIGURA 46: SUDDIVISIONE IN SOTTOBACINI	65
FIGURA 47: STRALCIO DELLA CARTA TECNICA COMUNALE VETTORIZZATA	67
FIGURA 48: PARTIZIONAMENTO IDEALIZZATO DEL SOTTOBACINO PER IL DEFLUSSO SUPERFICIALE [30]	68
FIGURA 49: ESEMPIO DI QUOTE DI FONDO DEI POZZETTI MANCANTI SU CORSO REGINA MARGHERITA	74
FIGURA 50: PENDENZE DEI COLLETTORI, ASSUNTE UGUALI PER I POZZETTI CON QUOTA INCOGNITA	75
FIGURA 51: ESEMPIO DI SEZIONE INCOGNITA IN VIA ZUMAGLIA	76
FIGURA 52: ESEMPIO DI SFOCIO MANCANTE IN DORA RIPARIA	77
FIGURA 53: MODELLO DELLA RETE SU SWMM	78
FIGURA 54: SIMULAZIONE DELLA RETE CON TEMPO DI PIOGGIA 1 ORA, CON LINK CAPACITY SI INTENDE IL GRADO DI RIEMPIMENTO DEL COLLETTORE.	79
FIGURA 55: SIMULAZIONE DELLA RETE CON TEMPO DI PIOGGIA 10 MINUTI	80
FIGURA 56: VOLUMI COMPLESSIVAMENTE ESONDATI DALLA RETE NEL CORSO DELL'EVENTO DI DURATA 10 MINUTI	81
FIGURA 57: COLLETTORI IN PRESSIONE DI VIA BOSELLI	82
FIGURA 58: PROFILO DEL COLLETTORE DI VIA PAOLO BOSELLI	83
FIGURA 59: COLLETTORI IN PRESSIONE NELL'AREA SPETTACOLI VIAGGIANTI	84
FIGURA 60: PROFILO DEL COLLETTORE DELL'AREA SPETTACOLI VIAGGIANTI ADIACENTE A CORSO REGINA MARGHERITA	85
FIGURA 61: STATO DELLA RETE AL TERMINE DELL'EVENTO DI DURATA 1 ORA DOPO AVER MODIFICATO I PARAMETRI DI HORTON	87
FIGURA 62: STATO DELLA RETE AL TERMINE DELL'EVENTO DI DURATA 10 MINUTI DOPO AVER MODIFICATO I PARAMETRI DI HORTON	88
FIGURA 63: POSIZIONE DEL PLUVIOMETRO "PLUTO 07"	89
FIGURA 64: IETOGRAMMA PER L'EVENTO DEL 31/08/2021	90
FIGURA 65: STATO DELLA RETE AL TERMINE DELL'EVENTO DEL 31/08/2021	91
FIGURA 66: IETOGRAMMA PER L'EVENTO DEL 19/09/2021	92
FIGURA 67: STATO DELLA RETE AL TERMINE DELL'EVENTO DEL 19/09/2021	93
FIGURA 68: VOLUMI COMPLESSIVAMENTE ESONDATI DALLA RETE NEL CORSO DELL'EVENTO DEL 19/09/2021	94
FIGURA 69: IDENTIFICAZIONE DEI POZZETTI ESONDATI NELLE 2 SIMULAZIONI	95
FIGURA 70: IETOGRAMMA COSTANTE PER PIOGGIA DI DURATA 10 MINUTI CON TR 10 ANNI	96
FIGURA 71: CARTA DEGLI ALLAGAMENTI RELATIVA AL TR 10 ANNI	97
FIGURA 72: SITUAZIONE PRE – INTERVENTO NELL'AREA SPETTACOLI	98
FIGURA 73: RISPOSTA DELLA RETE IN ZONA 2 DOPO LA SOSTITUZIONE DEI COLLETTORI	99

FIGURA 74: PROFILO DEI COLLETTORI NELL'AREA SPETTACOLI POST - INTERVENTI	100
FIGURA 75: SITUAZIONE PRE – INTERVENTO IN VIA BOSELLI	101
FIGURA 76: PLANIMETRIA DELL'AREA SOGGETTA AD INTERVENTO. IN GIALLO, IL POSSIBILE BYPASS FOGNARIO	102
FIGURA 77: AREA DI CORSO APPIO CLAUDIO POTENZIALMENTE INTERESSATA DALL'INTERVENTO	102
FIGURA 78: RISPOSTA DELLA RETE IN ZONA 1 DOPO L'INTRODUZIONE DEL COLLETTORE	102
FIGURA 79: PROFILO DEL NUOVO BYPASS CHE COLLEGA VIA BOSELLI CON IL CANALE DELLA PELLERINA	103

INDICE DELLE TABELLE

<i>TABELLA 1: GEOMETRIA DEI COLLETTORI</i>	34
<i>TABELLA 2: PARAMETRI DESCRIVENTI LA DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLA PIOGGIA DI DURATA 1 ORA</i>	44
<i>TABELLA 3: PARAMETRI DESCRIVENTI LA DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLA PIOGGIA DI DURATA 10 MINUTI</i>	46
<i>TABELLA 4: PARAMETRI DI HORTON</i>	62
<i>TABELLA 5: PERCENTUALE DI IMPERMEABILITÀ PER OGNI CATEGORIA DI SUPERFICIE</i>	67
<i>TABELLA 6: NUOVI PARAMETRI DI HORTON PER I SOTTOBACINI URBANI</i>	86
<i>TABELLA 7: EVENTO REGISTRATO DAL PLUVIOMETRO IL 31/08/2021</i>	90
<i>TABELLA 8: EVENTO REGISTRATO DAL PLUVIOMETRO IL 19/09/2021</i>	92

INTRODUZIONE

In seguito al verificarsi di un evento di precipitazione intensa, l'acqua che cade su una superficie naturale può essere assorbita all'interno del suolo (infiltrazione) o dalle piante (traspirazione), evaporare ed eventualmente giungere all'interno di un ruscello o di un fiume, cosa che non può accadere in caso di presenza di ampie superfici impermeabili, in quanto il ruscellamento superficiale diventa preponderante perché l'infiltrazione è molto ridotta. Il volume di ruscellamento deve essere smaltito dalla rete fognaria, che però può non essere in grado di farcela.

A fronte della crescente impermeabilizzazione dei suoli, infatti, i picchi di piena delle fognature sono alti (perché c'è molto ruscellamento), provocando l'esonazione dei corpi idrici in cui le reti scaricano o allagamenti dovuti a sezioni di fognatura non sufficienti a smaltire le portate che si generano in occasione di eventi di precipitazione intensa.

Lo scopo del presente lavoro è quello di esaminare la risposta della rete di drenaggio urbano della città, a seguito di eventi intensi di precipitazione per identificare i punti critici della rete che saranno oggetto di interventi.

Il seguente lavoro di tesi è in collaborazione con la società *SMAT S.p.A.*

La *SMAT* (acronimo di Società Metropolitana Acque Torino S.p.A.) è un'azienda che opera nel campo del servizio idrico integrato. Essa è nata nel 2001 a seguito della fusione tra l'Azienda acque metropolitane Torino S.p.A. e l'Azienda Po Sangone. Il Comune di Torino detiene direttamente o indirettamente il 65% delle azioni, mentre buona parte delle restanti azioni sono in possesso degli altri comuni serviti dalla *SMAT*. Oggi si occupa in particolare di:

- approvvigionamento idrico e impianti di potabilizzazione;
- raccolta, trattamento e riuso delle acque reflue urbane;
- impianti di cogenerazione e recupero energetico;
- cooperazione internazionale nel campo della formazione in tema di accesso all'acqua e dell'assistenza tecnica per la realizzazione di infrastrutture e di impianti idrici.

Il presente lavoro è strutturato come segue:

▪ **Capitolo I:**

Viene descritta brevemente l'interazione che avviene tra un evento meteorico e la rete di drenaggio urbano. Vengono altresì descritte una serie di elementi base sul funzionamento delle reti di drenaggio urbano con i relativi criteri di dimensionamento.

▪ **Capitolo II:**

Si analizza il bacino oggetto dello studio, parlandone anche in termini di criticità e le relative piogge che lo caratterizzano tramite *l'Atlante delle piogge intense*. Si discute sul software *QGIS* e sul carattere generale della rete fognaria, inclusi collettori e pozzetti.

▪ **Capitolo III:**

Il terzo capitolo tratta il software *SWMM*. Si analizza il funzionamento generale del software e si osservano quali sono i fattori e i parametri che determinano il suo corretto funzionamento. Si parla del modello d'infiltrazione utilizzato, del modello matematico e della conversione della rete avvenuta mediante *Matlab*.

▪ **Capitolo IV:**

Nel quarto capitolo si procede su *SWMM* con la simulazione vera e propria. Si analizza la risposta del bacino soggetta a 2 eventi di pioggia, uno di durata pari a 1 ora e uno di durata pari a 10 minuti e la successiva quantità di acqua esondata da ogni pozzetto che provocherà allagamenti del piano campagna. Alla fine, si simula un evento reale, grazie ad un pluviometro installato sul bacino che permetterà l'identificazione dei punti critici.

- *Capitolo V:*

Il quinto e ultimo capitolo riguarda l'identificazione dei collettori più critici che provocano un eccessivo allagamento del piano campagna e il successivo studio delle possibili soluzioni. In particolare, si procederà andando ad agire direttamente sui collettori interessati (si aumenterà la sezione e/o la forma), effettuando un giusto compromesso costi/benefici.

Capitolo I

IL DRENAGGIO URBANO

1.1. *Il drenaggio nelle aree urbane*

La completa urbanizzazione e di conseguenza l'impermeabilizzazione del territorio, dopo un intenso evento meteorico, può arrivare a comportare un **sovraccarico della rete fognaria** dovuto all'elevato deflusso superficiale.

La rete in questo caso riceve più acqua di quella che potrebbe smaltire in sicurezza e come conseguenza si hanno dei fenomeni di **rigurgito** e **allagamento** delle aree urbane, come mostrato in figura 1.



Figura 1: Esempio di rigurgito di una fognatura [4]

La scelta delle portate di progetto in un sistema di drenaggio urbano è il risultato di un'analisi costi-benefici. La frequenza delle insufficienze o crisi della fognatura viene caratterizzata con il **tempo di ritorno(T)**, ovvero il numero di anni che in media trascorre tra eventi che danno origine a portate pluviali maggiori della portata di progetto. Il tempo di ritorno è associato alla probabilità di accadimento della portata di progetto ($P(Q)$)

$$T = \frac{1}{1 - P(Q)} \tag{1.1}$$

$$P(Q) = 1 - \frac{1}{T} \tag{1.2}$$

Di seguito si mostrano in figura 2 i tempi di ritorno caratteristici nei sistemi di drenaggio urbano:

<i>Tempi di ritorno T [anni]</i>	<i>Condotti fognari e vie d'acqua superficiali</i>
1 ÷ 5	Condotti fognari la cui insufficienza determini scorrimenti idrici superficiali non pericolosi e con possibilità di smaltimento alternativo agevole verso recapiti esterni (aree verdi e/o corpi idrici ricettori)
5 ÷ 10	Condotti fognari la cui insufficienza determini scorrimenti idrici superficiali e/o allagamenti aventi carattere di entità e pericolosità non altrimenti eliminabile
10 ÷ 20	Condotti fognari situati in siti pianeggianti di naturale confuenza delle acque meteoriche, privi di possibilità di smaltimento alternativo delle stesse e la cui insufficienza determini situazioni pericolose
20 ÷ 100	Vie superficiali di convogliamento delle acque meteoriche eccedenti la capacità idraulica delle fognature, in siti urbanizzati in cui l'allagamento provochi danni inaccettabili agli insediamenti

Figura 2: Tabella raffigurativa i tempi di ritorno dei condotti fognari [17]

1.2. Definizione di rete di drenaggio urbano

I principali obiettivi delle reti di drenaggio urbano sono:

- 1) Raccogliere e trasportare le acque nelle zone urbane.
- 2) Mitigazione dell'impatto sui corpi idrici recettori, ossia danneggiare il meno possibile l'ecosistema ricevente.

La rete è collegata a dei **collettori fognari** che trasportano l'acqua e la vanno a scaricare, passando normalmente da un depuratore.

Di solito i collettori vanno posizionati sempre in trincee scavate nel terreno e hanno una profondità di posa minima circa pari a 1-1.2m, ma spesso si va anche a profondità maggiori per evitare il rischio di contaminazione.

La rete fognaria può avere oltre ai collettori, uno sgrigliatore che mantiene il materiale più grossolano e un disoleatore che rimuove oli e gas separandoli. Questi due elementi si possono avere principalmente per le acque di prima pioggia.

Nelle reti fognarie si cerca sempre di evitare le stazioni di sollevamento e si preferisce sempre quindi le reti a **gravità**.

Ci sono poi i **pozzetti** che hanno la funzione di permettere l'ispezione della rete fognaria e di connettere collettori diversi, come mostrato in figura 3.



Figura 3: Esempio di un pozzetto [1]

Normalmente si effettua una distinzione per i tipi di acqua che vanno a defluire nelle fognature e a tal proposito si parla di:

- **Acque nere**, ossia le acque reflue (di rifiuto) e hanno problemi di **qualità**.
- **Acqua bianche**, ossia le acque meteoriche e hanno problemi di **quantità** ($Q_{bianca}=10 \div 100 Q_{nera}$).

In realtà nelle acque bianche ci sarebbe anche il problema della qualità, ma riguarda principalmente le **acque di prima pioggia**.

Per le acque nere è necessario porre una particolare attenzione alla sedimentazione del materiale trasportato, perché pone un grosso problema nella rete, dovuto al fatto che ciò che sedimenta è la materia organica e nel tempo tende a incrostarsi e aderisce al fondo del collettore diventando molto difficile da rimuovere.

Per le acque bianche, visto che il problema è la quantità, si deve approcciare il problema da un punto di vista **idrologico**, perché il vero problema sono i **picchi di portata**.

Un'altra distinzione che riguarda l'infrastruttura fognaria prevede di capire come viaggiano i 2 tipi di acque e a tal proposito si distinguono 2 reti (come si mostra successivamente in figura 4):

- **Reti miste**, che trasportano le acque bianche e le acque nere assieme e quindi c'è un effetto di "lavaggio" durante gli effetti di pioggia. Questo però è il sistema più vecchio, infatti ci sono dei costi inferiori e il diametro di tali reti si dimensiona tenendo esclusivamente conto della portata di picco $Q_{max}=Q_{bianca}$, perché la Q_{nera} è trascurabile.
- **Reti separate**, che trasportano le acque bianche e le acque nere in 2 strade diverse. Esse hanno il vantaggio che la separazione consente di agevolare le condizioni di trattamento e permette di gestire meglio i problemi di impatto ambientale sul corpo idrico ricettore.

Per quanto riguarda le acque nere è più semplice lavorare con volumi più piccoli e concentrati piuttosto che il contrario perché è più semplice per il depuratore andare a ridurre una concentrazione elevata che una concentrazione bassa.

Per le acque bianche si potrebbe prevedere a volte un solo trattamento per le acque di prima pioggia, mentre il resto, tutto sommato, può andare direttamente nel corpo idrico.

Le reti sono formate dai **collettori fognari a superficie libera**. La rete fognaria non è progettata per andare in pressione, tranne per casi particolari.

Per i collettori si possono adottare diversi materiali:

- **Calcestruzzo**, costa poco e viene usato soprattutto per le acque bianche, perché per le acque nere provoca problemi di incrostazione dovuto a una serie di reazioni chimiche che creano degli acidi e quindi si potrebbe deteriorare. Nelle reti miste, quando viene usato il cls, a volte si usano dei rivestimenti in **gres**.
- **Materiali plastici (PE, PVC)**, hanno come vantaggi il fatto di essere leggeri, economici e più resistenti del cls per quanto riguarda la natura chimica delle acque e per questo motivo tali materiali si possono usare per tutti i tipi di acque.
- **Gres**, è un materiale ceramico e si usa essenzialmente per le acque nere perché ha una resistenza sia chimica che meccanica molto elevata e ha una scabrezza molto ridotta, ma economicamente meno conveniente rispetto ad altri materiali.

Le reti vengono progettate per portate di progetto diverse:

Nel caso di reti miste serviranno la $Q_{\max, \text{bianca}}$ e la $Q_{\min, \text{nera}}$ (che serve per verificare l'assenza di sedimentazione).

Nel caso di reti separate serviranno la $Q_{\max, \text{nera}}$, la $Q_{\min, \text{nera}}$ e la $Q_{\max, \text{bianca}}$. (non si tiene in conto della $Q_{\min, \text{bianca}}$ perché la sedimentazione non è un problema grosso per le reti bianche perché la sabbia, anche se tende a sedimentarsi non crea incrostazioni, l'unico problema potrebbe essere quello abrasivo).

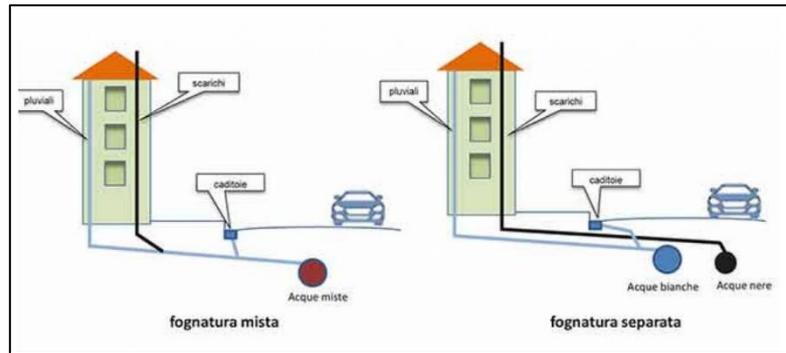


Figura 4: Differenza tra una fognatura mista e una fognatura separata [7]



Figura 5: Collettore in cls [18]



Figura 6: Collettore in PVC [22]

Il tramite del collettamento alla fogna nera è l'**allaccio** fognario (fognolo), il tratto di condotta che unisce il luogo di produzione dello scarico al sistema di raccolta ed allontanamento cittadino.

Tutte le utenze ricadenti in centri serviti da reti di fognatura, o in periferia o anche in borgate separate in cui il servizio è stato addotto, sono tenute a collegare i loro scarichi alla fogna stradale se gli immobili di pertinenza fruiscono del rifornimento idrico.

Il pozzetto domestico, che ospita il sifone intercettatore, è l'origine dell'allacciamento, tutto ciò che è a valle è di competenza dell'ente gestore, tutto ciò che è a monte è di competenza del privato.

Il sifone intercettatore, come prescritto dalla normativa attuale, ha il compito di impedire il ritorno all'interno delle case o delle strutture delle esalazioni maleodoranti o dei gas che dovessero formarsi nella rete fognaria stradale, ma anche quelle di impedire che corpi estranei di pezzatura superiore alla luce della sua gola, superino lo sbarramento da esso costituito e vadano ad intasare, ostruendolo il condotto di collegamento stradale.

Il sifone può essere costituito di uno o più aerofori per la ventilazione della fognatura. La pendenza dell'allacciamento è assunta molto elevata, va dal 5% al 10%, quando è possibile in funzione della disponibilità di quote, ma mai meno del 2%, per consentire il rapido deflusso delle portate scorrenti ed il trascinarsi dei corpi solidi.

Per le acque bianche la situazione è un po' più complessa. L'acqua, per entrare nella rete, ha bisogno di punti di accesso e quindi si predispongono delle **caditoie**. Esse sono aperture che permettono l'ingresso delle acque meteoriche in rete e possono essere: a griglia, a bocca di lupo, a fessura. Di solito sono disposte con una frequenza spaziale di circa 10/25 metri.

In figura 7 si mostra una caditoia a griglia:

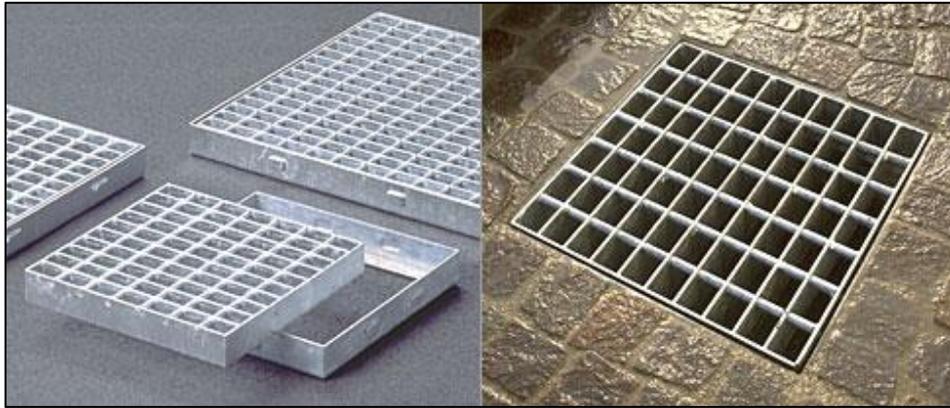


Figura 7: Esempio di caditoia a griglia [10]

Per ogni caditoia c'è poi un pozzetto che con uno scarico va a collegarsi a un collettore delle reti bianche.

1.3. Condizioni di funzionamento delle reti fognarie

Un termine con cui si ha spesso a che fare quando si parla di fognature è il **GRADO DI RIEMPIMENTO** (figura 8).

Assumendo che il tubo sia di sezione circolare, allora il grado di riempimento del tubo è definito come:

$$G = \frac{Y}{D} = \frac{\frac{D}{2} + \frac{D}{2} \cdot \cos(\pi - \frac{\theta}{2})}{D} = (1 - \cos \frac{\theta}{2})$$

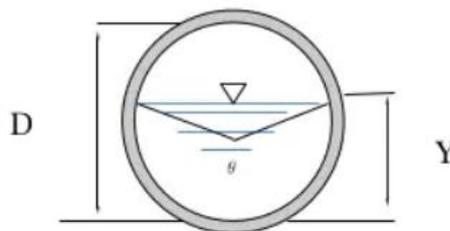


Figura 8: Grado di riempimento di un collettore [22]

$$\frac{Y}{D} \leq 0,7 \text{ per } D > 500 \text{ mm} \quad (1.3)$$

$$\frac{Y}{D} \leq 0,5 \text{ per } D < 500 \text{ mm} \quad (1.4)$$

Se la condotta non è in pressione, dall'idraulica si può dimostrare che in teoria la portata massima non si verifica per $Y/D=1$, ma per $Y/D \cong 90\%$, ma per avere un franco di sicurezza si sceglie come limite il 70% perché quello che deve defluire nella rete non è solo acqua e quindi se il collettore è troppo pieno rischio di avere degli intasamenti.

Le **velocità massime** hanno a che fare con l'abrasione e quindi i collettori vengono dimensionati con velocità che sono dell'ordine di $1 \div 2 \text{ m/s}$.

Le **velocità minime** sono per lo più legate alle acque nere e quindi i collettori devono avere velocità maggiori di $0.4 \div 0,5 \text{ m/s}$ per evitare il problema della sedimentazione. Un criterio alternativo prevede di garantire anche uno **sforzo tangenziale minimo (τ) pari a 2 Pa**.

Per giocare con le velocità si può operare con le **pendenze (s)**, che non devono essere né troppo alte e né troppo basse. Per le zone pianeggianti si hanno pendenze dell'ordine del $1 \div 2\%$, mentre per le zone collinari sono del $1 \div 2\%$.

1.4. Dimensionamento delle reti fognarie

Il flusso, come già detto in precedenza, avviene a **superficie libera**.

L'equazione che governa le correnti a superficie libera è l'*equazione di Chezy*:

$$Q = A\chi\sqrt{RJ}$$

(1.5)

Avendo indicato con:

A= Area bagnata

χ = Fattore di Chezy= $k_s R^{1/6}$

R= Raggio idraulico

J= Cadente piezometrica (che in moto uniforme coincide con la pendenza fisica del collettore)

K_s = Coefficiente di Strickler

Un'alternativa alla legge di Chezy sono i software che sfruttano modelli numerici in condizione di moto permanente/vario e riescono a gestire le variazioni spaziali, un tipico esempio è il software *EPA SWMM*.

1.4.1. Dimensionamento rete bianca-trasformazione afflussi/deflussi

Il dimensionamento della rete bianca richiede come primo elemento la conoscenza delle **precipitazioni** e perciò si fa riferimento alle **curve di possibilità pluviometrica (CPP)**, come mostrato in figura 9.

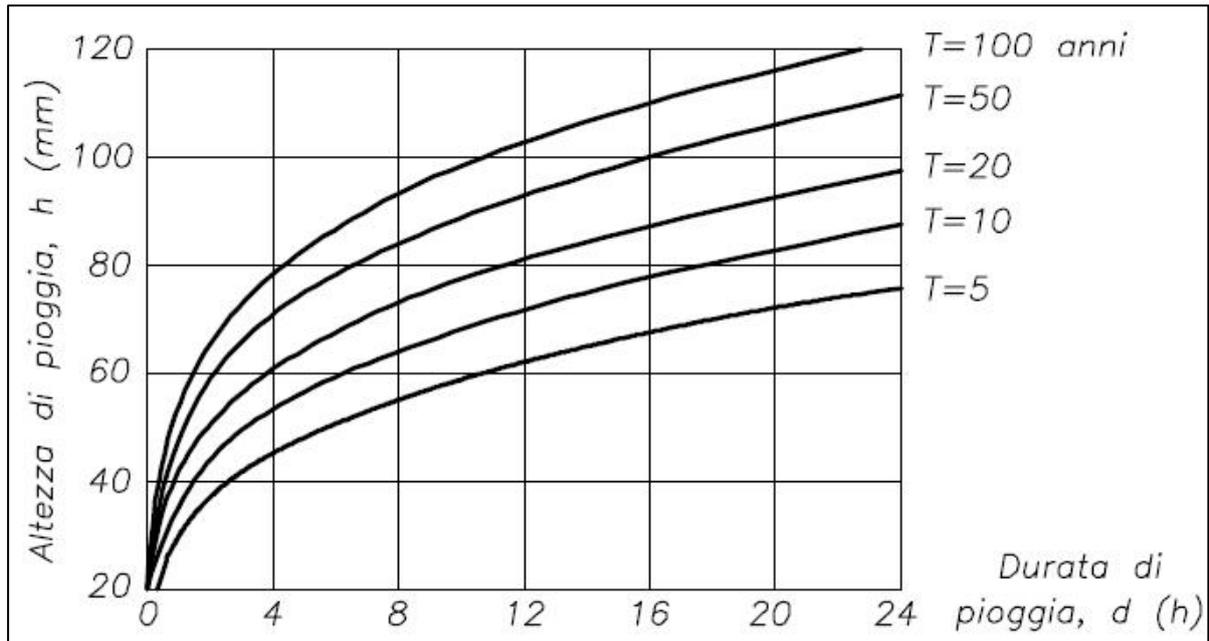


Figura 9: Esempio di curva di possibilità pluviometrica CPP [11]

Il legame tra l'altezza di pioggia e la durata di pioggia è di tipo esponenziale:

$$h = a \cdot t^n$$

(1.6)

Dove i coefficienti **a**, **n** sono funzione del **tempo di ritorno dell'evento**.

Tipicamente per una rete bianca si prende come tempo di ritorno un valore che varia dai 10 ai 20 anni. Più aumenta il tempo di ritorno e più diminuisce la probabilità che il sistema vada in crisi.

Quello che interessa ai progettisti però non sono le altezze di pioggia, ma l'**intensità di pioggia**:

$$i = \frac{h}{t} = a \cdot t^{n-1}$$

(1.7)

Dall'intensità di pioggia si passa all'**intensità di pioggia netta** (che sarà minore dell'intensità di pioggia totale) dovuta a:

- infiltrazione** (quota parte più importante)
- immagazzinamento superficiale** (chiamato anche **storage**, perché l'acqua si accumula da qualche parte, ad esempio nei tetti delle case)
- intercettazione** (legata alla vegetazione che trattiene una piccola quota parte d'acqua, ad esempio le foglie degli alberi)
- evapotraspirazione** (quota trascurabile)

I seguenti concetti sono espressi in figura 10.

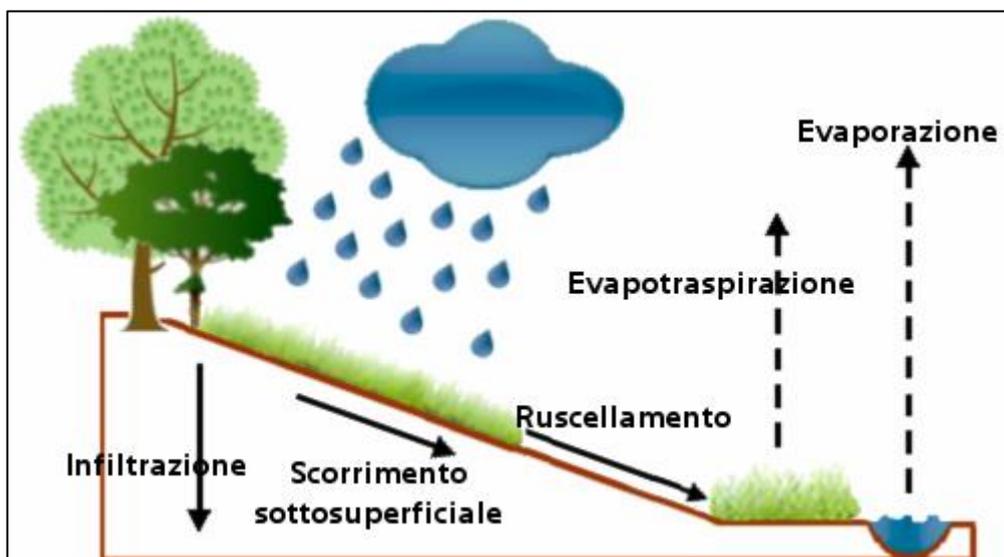


Figura 10: Schema di pioggia netta [8]

Tutto ciò viene immagazzinato in un **coefficiente di deflusso φ** :

$$\varphi = \frac{\textit{Volume di precipitazione netta}}{\textit{Volume di precipitazione totale}}$$

φ sarà compreso tra 0 ed 1.

I valori di φ sono tabulati in funzione della tipologia del terreno.

$$\varphi = \frac{\sum S_i \cdot \varphi_i}{\sum S_i}$$

(1.8)

Con S_i = superficie di una certa area riferita ad un certo coefficiente di deflusso.

1.4.2. *Metodi per il dimensionamento delle reti bianche*

I metodi più comuni per il dimensionamento della rete bianca sono:

1. *Metodo della corrivazione*

Le ipotesi alla base di tale metodo sono:

-risposta del sistema costante o invariante nel tempo, ossia per eventi diversi, una funziona $f(t)$ rimane la stessa e quindi ogni particella che cade nello stesso punto ci mette lo stesso tempo a raggiungere la sezione di chiusura.

-risposta del sistema di tipo lineare, quindi se la pioggia raddoppia, raddoppierà anche la portata, per cui vale il principio di sovrapposizione degli effetti.

$$Q(t) = \int_0^t f(t - \tau) I(\tau) d\tau$$

(1.9)

Avendo indicato con:

I =afflussi=portata legata alle precipitazioni nette [m^3 / s]

f =funzione che determina la risposta del sistema

τ =tempo di ingresso

t =tempo di uscita della rete

$t - \tau$ =tempo di percorrenza

Il metodo della corrivazione si basa quindi sui **tempi di trasporto dell'acqua**.

Si definisce adesso una $F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau$ =DISTRIBUZIONE CUMULATA DI PROBABILITA' (CDF), che ci servirà per definire il **tempo di corrivazione del bacino (t_c)**, ossia il tempo oltre il quale $F(t)$ raggiunge il valore unitario e quindi t_c sarà il massimo tempo di trasporto.

Dal punto di vista geometrico si può definire il tempo di corrivazione come la % di area del bacino che contribuisce a fornire portata, nel caso del t_c si ha il 100% di area. In figura 11 si mostra una PDF e una CDF:

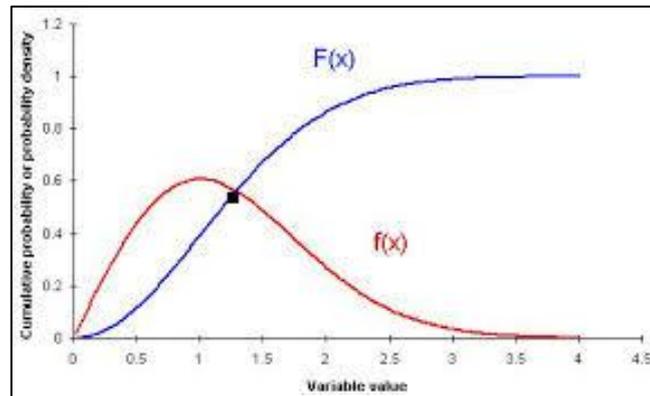


Figura 11: Esempio di una PDF (in rosso) e di una CDF (in blu) [15]

Nel metodo della corrivazione si fa riferimento a uno **ietogramma costante nel tempo**, come in figura 12:

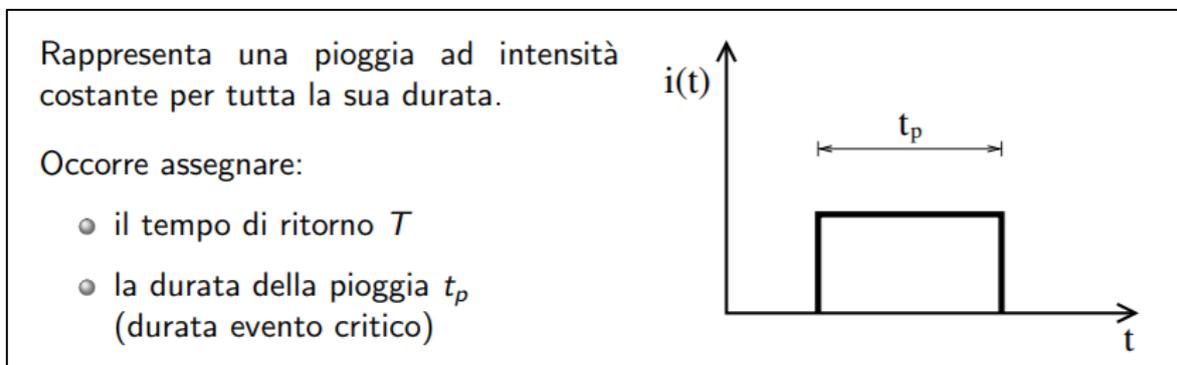


Figura 12: Ietogramma costante [6]

$$I(t) = \varphi \cdot i(t_p) \cdot S \quad \text{se } t \leq t_p \tag{1.10}$$

$$I(t) = 0 \quad \text{se } t > t_p \tag{1.11}$$

Il massimo valore di portata si ha in corrispondenza di t_p :

$$Q(t_p) = \varphi \cdot i(t_p) \cdot S \cdot \int_0^{t_p} f(\tau) d\tau = \varphi \cdot i(t_p) \cdot S \cdot F(t_p) \quad (1.12)$$

Visto che i e F dipendono da t_p , si deve riuscire a calcolare proprio la t_p critica, cioè quella che dà origine a una Q_{max} .

Se t_p aumenta, aumenterà anche la $F(t)$ fino a diventare costante e quindi la $i(t_p)$ diminuisce e $h(t)$ aumenta.

Calcolando la Q_{max} per $t_p=t_c$ si ottiene la **Formula razionale**:

$$Q_{max} = \varphi \cdot i(t_c) \cdot S \quad (1.13)$$

Questa Q_{max} servirà proprio per dimensionare i collettori fognari della rete bianca.

t_c deve essere stimato: $t_c = t_A + t_R$

Avendo chiamato:

t_A = tempo di accesso in rete, ossia il tempo che passa da quando una goccia d'acqua cade sul terreno fino a quando entra nella rete fognaria attraverso una caditoia; di solito è un tempo abbastanza breve, dell'ordine dei 5/10 min.

t_R = tempo che ci mette l'acqua a percorrere la rete fognaria, fino ad arrivare al collettore; di solito è il tempo che incide di più, perché la maggior parte del percorso è dentro la rete, non fuori:

$$t_R = \sum \frac{L_i}{U_i} = \sum \frac{\text{Lunghezza di ogni singolo collettore}}{\text{Velocità all'interno del collettore}}$$

2. Metodo dell'invaso lineare

Il metodo dell'invaso lineare non si concentra più sui tempi di percorrenza dell'acqua, ma sul **processo di invaso**, che è quel processo che porta all'accumulo di acqua nel sistema e al successivo rilascio. In pratica si potrebbe dire che il bacino viene caratterizzato come una vasca che prima si riempie e poi si svuota. Si riporta ciò in figura 13:

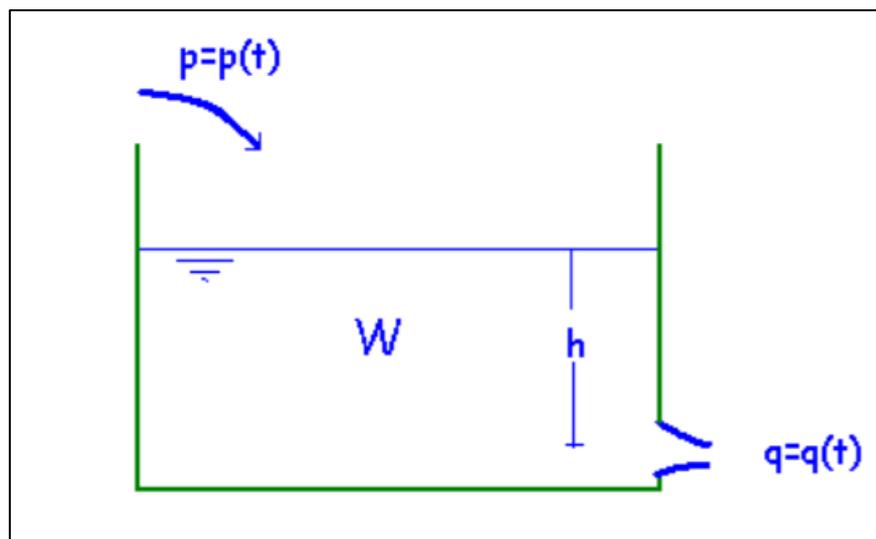


Figura 13: Modello dell'invaso lineare, serbatoio con luce di fondo [5]

All'interno del bacino e della rete è presente, in un certo istante, un volume d'acqua invasato $w(t)$ e la portata che defluisce nella rete e nel collettore è funzione di quanto volume d'acqua si trova all'interno della rete stessa.

Ovviamente più acqua è presente e più il volume $w(t)$ aumenta e di conseguenza aumenta anche la portata defluita $Q(t)$.

$$Q(t) = \frac{w(t)}{k}$$

(1. 14)

La relazione è lineare, con k = costante d'invaso [s].

Si parte da un **bilancio di massa**:

$$\frac{dw(t)}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (1.15)$$

Sostituendo a $w(t)$ la relazione scritta sopra si ottiene:

$$k \cdot \frac{dQ(t)}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (1.16)$$

Questa è un'equazione differenziale del 1° ordine con $I(t)$ forzante del sistema che si ottiene dallo ietogramma di progetto assunto costante.

La **soluzione** è un'integrale di convoluzione:

$$Q(t) = \int_0^t \left(\frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t-\tau}{k}} \right) I(\tau) d\tau \quad (1.17)$$

Non rimane che sostituire la $I(t)$ nell'integrale di convoluzione ottenendo così:

$$Q(t) = \varphi \cdot i(t_p) \cdot S \cdot (1 - e^{-\frac{t}{k}}) \quad (1.18)$$

- Per $t \rightarrow \infty$, $Q(t) = \varphi \cdot i(t_p) \cdot S \rightarrow$ **Formula razionale**
- Per $t=0$, $Q(t) = 0$
- Per $t=t_p$, $Q(t) = Q_{max} = \varphi \cdot i(t_p) \cdot S \cdot (1 - e^{-\frac{t_p}{k}})$
- Per $t > t_p$, $Q(t) = Q_{max} \cdot e^{-\frac{t-t_p}{k}}$

Questi concetti vengono sintetizzati in figura 14.

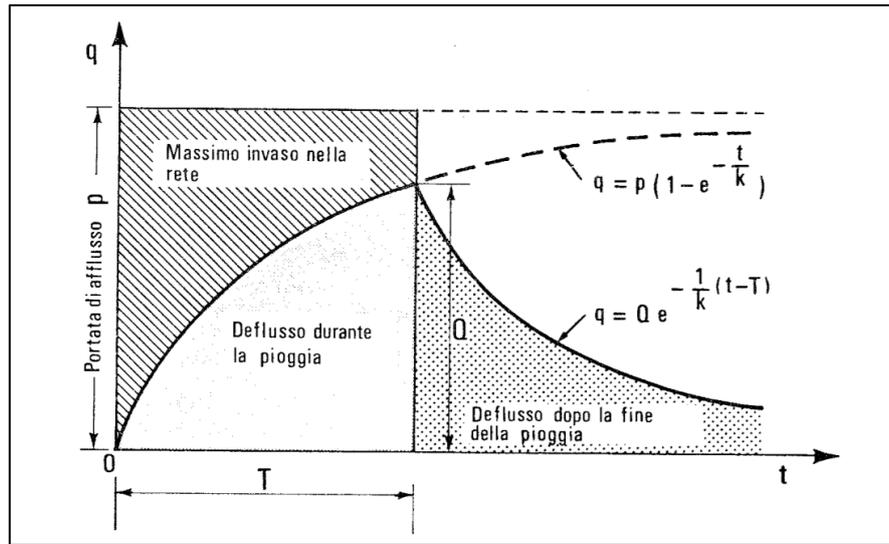


Figura 14: Relazione tra portata e tempo nel metodo dell'invaso lineare [5]

L'obiettivo è quello di trovare la **portata critica**:

$$\frac{dQ_{max}}{dt} = 0$$

(1.19)

$$\rightarrow n = 1 - \frac{T \cdot e^{-T}}{1 - e^{-T}}$$

Con $T = t_p/k$ ed n che deriva dalla relazione $i(t_p) = a \cdot t_p^{n-1}$.

In letteratura c'è una tabella che al variare di T corrisponde una n e dopo, conoscendo k , si può trovare t_p .

Per la costante d'invaso sono presenti diverse formule empiriche:

$$k = 4,19 \cdot \frac{S^{0,30}}{I_m \cdot (d_c \cdot 100)^{0,38}} - 0,21 \quad [\text{Desbordes, 1975}]$$

$$k = 0,5 \cdot S^{0,351} \cdot \frac{d^{0,358}}{I_m^{0,163} \cdot (J_R \cdot 100)^{0,29}} \quad [\text{Ciaponi, 1992}]$$

$$k = 3,458 \cdot \frac{L_c^{0,6}}{i^{0,4} \cdot J_c^{0,3} \cdot k_s^{0,3}} \quad [\text{Pedersen}]$$

Avendo indicato con:

- $k = [\text{min.}]$
- $S = [\text{ha}] = \text{superficie bacino}$
- $I_m = [-] = \text{superficie impermeabile/superficie bacino}$
- $J_c = [-] = \text{pendenza media della rete}$
- $d_c = [\text{m/ha}] = \text{lunghezza totale rete collettori/superficie bacino}$
- $k_s = \text{coefficiente di Strickler}$
- $i = [\text{mm/h}] = \text{intensità media dell'evento}$
- $L_c = [\text{m}] = \text{lunghezza collettore principale}$

La costante d'invaso k è il fattore di maggiore incertezza nel metodo dell'invaso.

3. Metodo italiano dell'invaso lineare

Questo metodo è una variante rispetto al classico metodo dell'invaso lineare.

In pratica, si evita di calcolare k , che, come detto prima, è il fattore di maggiore incertezza e si passa ai **volumi invasati**.

Dal precedente metodo si sa che $k = \frac{W(t)}{Q(t)}$, ma visto che questa espressione vale in qualsiasi istante, ci si mette nel caso in cui $k = \frac{W_{MAX}}{Q_{MAX}}$

Con $W_{MAX} = W_0 + \Sigma W_C$.

$W_0 = \text{contributo del bacino}$

$\Sigma W_C = \text{contributo dei collettori}$

Si definisce un parametro $u = \frac{Q_{MAX}}{S} = \text{coefficiente udometrico} = \left[\frac{l}{s \cdot ha} \right]$ che indicativamente varia dai 10 ai 100 $\left[\frac{l}{s \cdot ha} \right]$.

Sostituendo $k = \frac{W_{MAX}}{Q_{MAX}}$ in $Q_{max} = \varphi \cdot i(t_p) \cdot S \cdot (1 - e^{-\frac{t_p}{k}})$ si ottiene:

$$u = \frac{Q_{MAX}}{S} = 2168 \cdot \frac{n(\varphi \cdot a)^{\frac{1}{n}}}{\omega_{MAX}^{\frac{1}{n}-1}}$$

(1.20)

Con $\omega_{MAX} = \frac{W_{MAX}}{S} = [m]$

$$a = \left[\frac{m}{h^n} \right]$$

Capitolo II

ANALISI DEL BACINO OGGETTO DI STUDIO

2.1. Descrizione dell'area oggetto dello studio

2.1.1. Inquadramento

La zona oggetto di approfondimento ricade all'interno del bacino identificato come M in figura 15. Esso ricade all'interno di un progetto più ampio, portato avanti al fine di modellare più bacini della città. Si mostra in figura 15 la classificazione dei bacini idrografici della città:

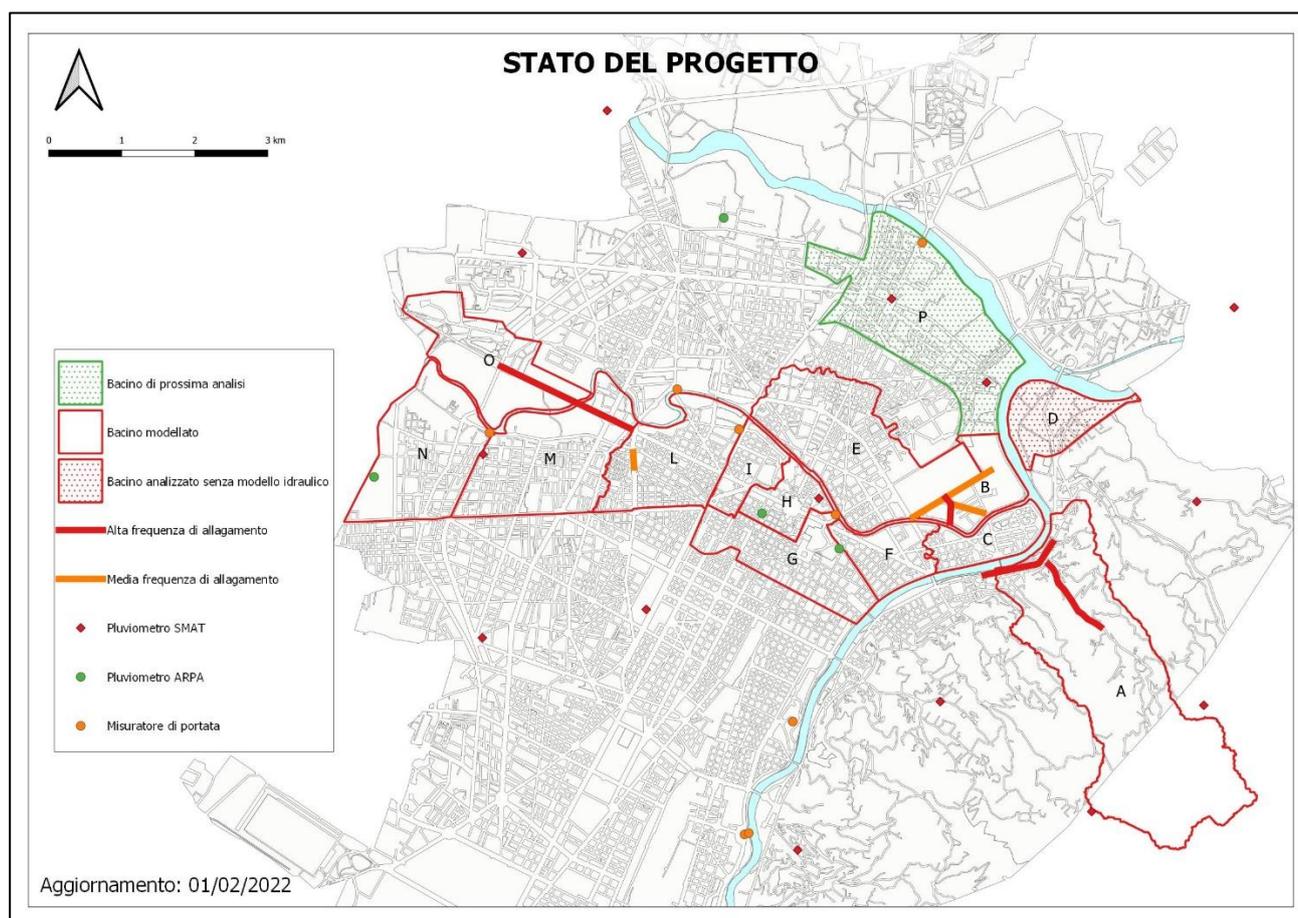


Figura 15: Mappa della suddivisione parziale della rete di drenaggio della Città di Torino in bacini ai fini della modellazione numerica

Si raffigurano in figura 16 i contorni del bacino oggetto di analisi e la sua posizione all'interno del Comune di Torino:

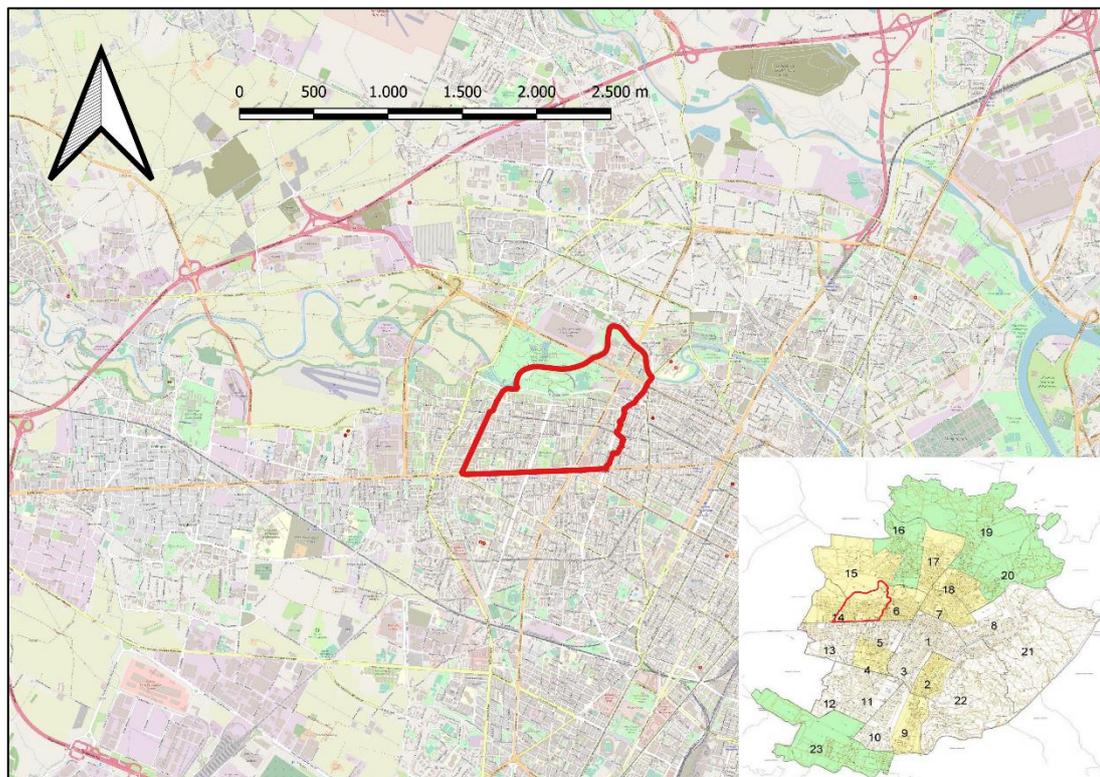


Figura 16: Inquadramento del bacino M, con annessa cartografia del Comune di Torino

I numeri sulla cartografia del Comune di Torino indicano i quartieri della città:

- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1) Centro Storico | 13) Pozzo Strada |
| 2) San Salvario – Valentino | 14) Parella |
| 3) Crocetta – San Secondo | 15) Le Vallette - Lucento |
| 4) San Paolo | 16) Lanzo |
| 5) Cenisia | 17) Borgata Vittoria |
| 6) Campidoglio – San Donato | 18) Barriera di Milano |
| 7) Aurora – Rossini | 19) Falchera - Rebaudengo |
| 8) Vanchiglia | 20) Regio Parco |
| 9) Nizza | 21) Madonna del Pilone |
| 10) Lingotto | 22) Borgo Pò |
| 11) Santa Rita | 23) Mirafiori Sud |
| 12) Mirafiori Nord | |

In dettaglio, in figura 17, si estrapola il bacino M:

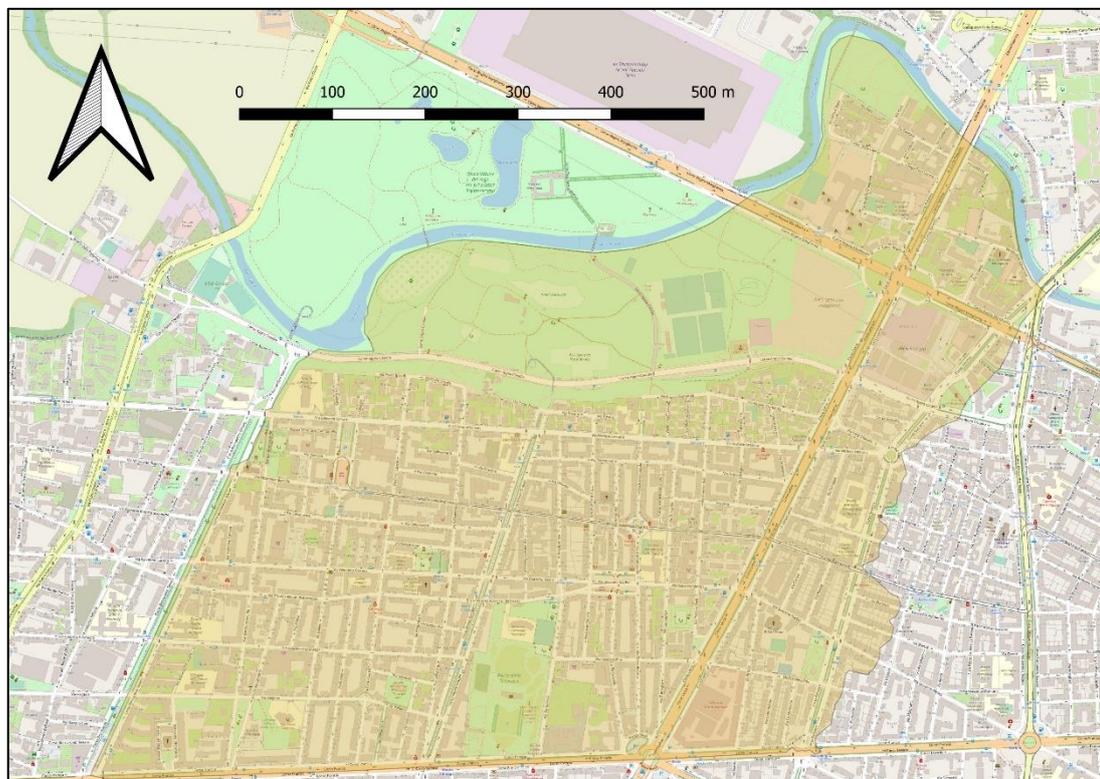


Figura 17: Bacino oggetto di analisi

A nord, il bacino è interessato dalla presenza del Parco della Pellerina. La porzione sud è invece più urbanizzata, con la presenza di vari corsi principali della città quali Corso Lecce, Corso Francia, Corso Appio Claudio, Corso Telesio, Corso Montegrappa.

Il bacino fa parte del quartiere **Parella** e del quartiere **Campidoglio** di Torino.

Il quartiere Parella fa parte della periferia ovest della città, precisamente all'interno della circoscrizione 4 ed è delimitato come segue:

- A sud da **Corso Francia** (confine con Pozzo Strada)
- A est da **Corso Lecce** (confine con Campidoglio)
- A nord da **Corso Regina Margherita** (confine con Vallette e Lucento)
- A ovest da **Corso Bernardino Telesio**

Di particolare rilievo la zona sud del Parco della Pellerina, lungo Corso Appio Claudio che gode di una vista panoramica (figura 18), per la sua posizione leggermente sopraelevata, rispetto alla naturale depressione fluviale del fiume Dora Riparia.

La porzione a nord del Parco della Pellerina è interessata dalla presenza di un tratto di Corso Regina Margherita, che, secondo la mappa del rischio idrogeologico della città, è considerata ad alto rischio di allagamento.



Figura 18: Parco della Pellerina e Dora Riparia [23]

2.1.2. Criticità dell'area

Secondo la mappa del rischio idrogeologico (figura 19) sviluppata dal comune di Torino, la zona oggetto dell'analisi è suscettibile a fenomeni di allagamento con frequenza elevata:

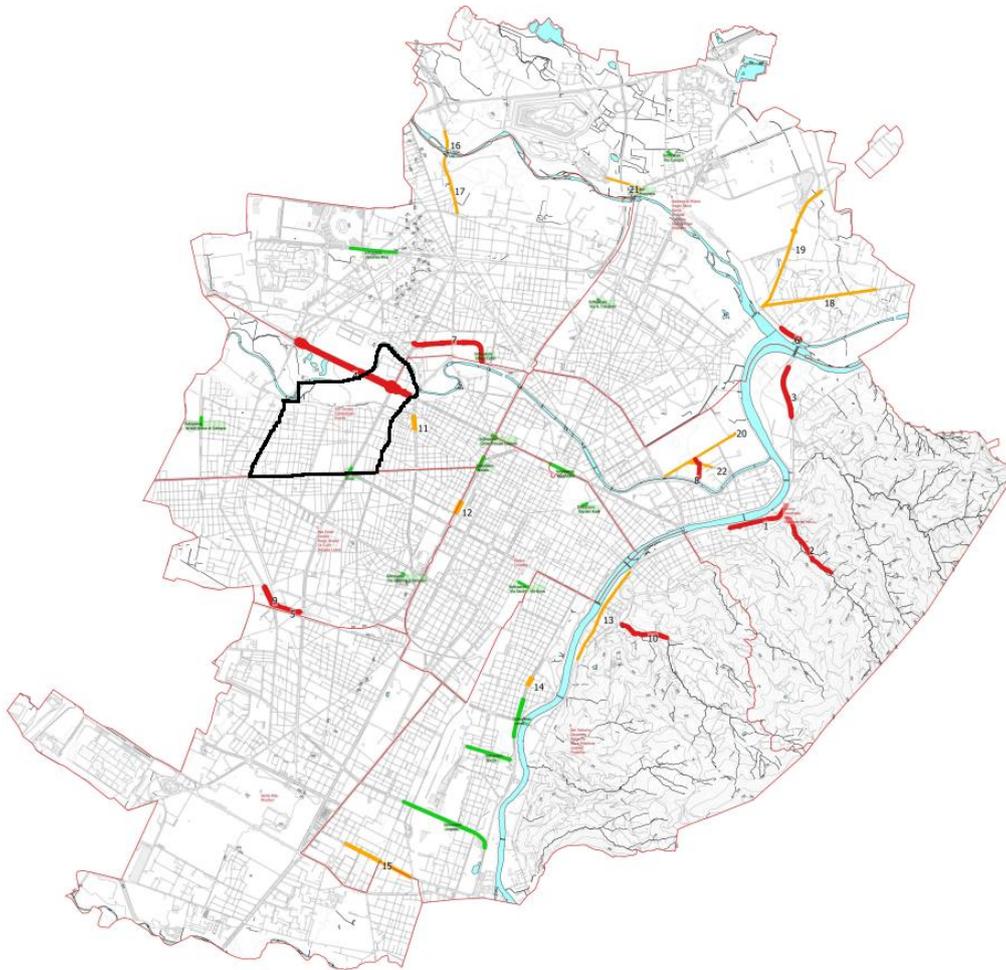


Figura 19: Mappa del rischio idrogeologico della città di Torino [20], in rosso si ha una frequenza elevata di allagamenti, in arancione una frequenza moderata di allagamenti

In particolare, Corso Regina Margherita risulta particolarmente a rischio allagamenti con una frequenza elevata (linea rossa).

2.2. *Analisi morfologica dell'area*

Si adotta il software *QGIS*. Esso è un software GIS (Geographic Information System), che permette di analizzare ed editare dati spaziali e di generare cartografia. *QGIS* supporta sia dati vettoriali che raster.

QGIS permette di far confluire dati provenienti da diverse fonti in un unico progetto di analisi territoriale. I dati, divisi in *Layers*, possono essere analizzati e da essi viene creata l'immagine mappa con il graficismo che può essere personalizzato dall'utente ed eventualmente rispondere alle analisi tipiche del GIS - gradazione di colori, sfumatura di colore, valore unico.

Il passo seguente è stato quello di scaricare dal sito del *Geoportale della Regione Piemonte* un **DTM**, con passo 5m, utile a descrivere l'orografia del territorio e di conseguenza a suddividere l'area analizzata in diversi **bacini idrografici**.

Tra i prodotti della fotogrammetria di prossimità mediante drone ci sono i modelli digitali del terreno DSM e DTM (Digital Surface Model e Digital Terrain Model).

Il DSM è il modello che rappresenta per ogni pixel la quota della superficie di una certa zona, compresi gli elementi antropici presenti (edifici, manufatti, ecc) e la copertura vegetale.

Il DTM invece rappresenta la quota della superficie terrestre senza tali elementi. Nel flusso delle elaborazioni della fotogrammetria di prossimità si procede calcolando inizialmente il DSM; successivamente, con l'aiuto di tecniche diverse in funzione del tipo di applicazione e di prodotto da realizzare, si produce il DTM.

In figura 20 si mostra la differenza tra un DSM e un DTM.

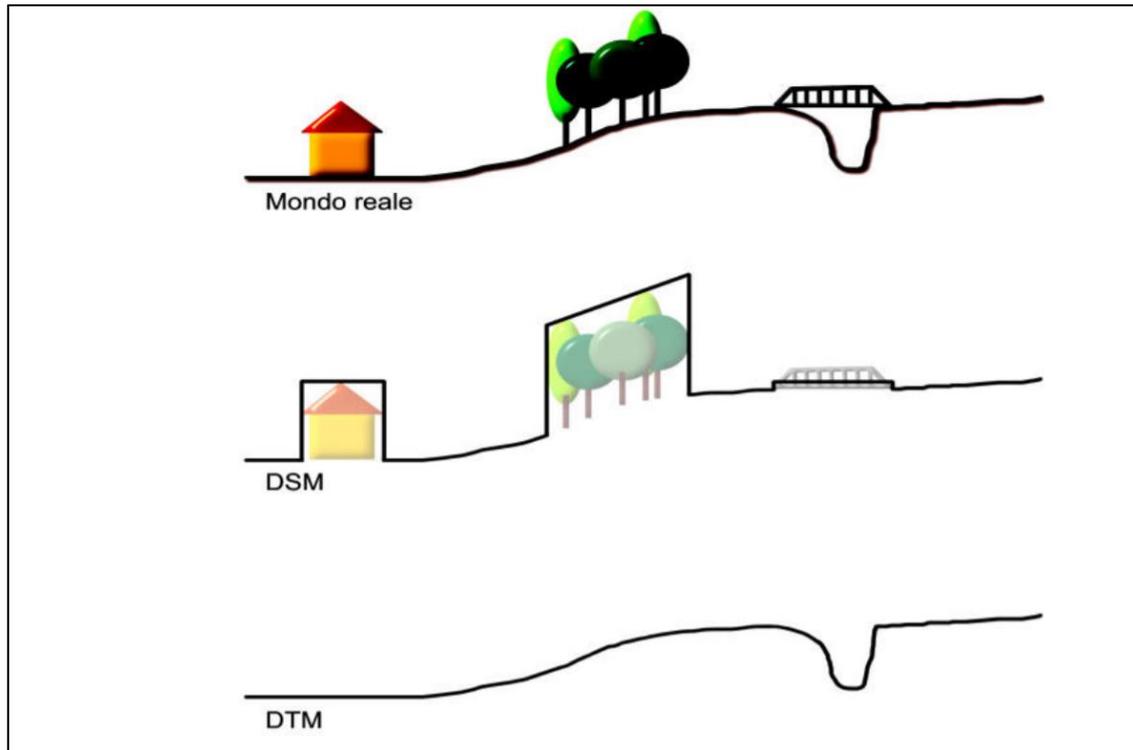


Figura 20: Un esempio di confronto tra DSM e DTM [13]

Il DTM servirà in seguito, oltre che per descrivere l'orografia del terreno utile a suddividere i bacini idrografici, anche a definire le pendenze medie dei sottobacini, da caricare come input in SWMM.

Con le interpolazioni delle *curve di livello*, QGIS riesce a suddividere il territorio in punti con uguale quota, ovvero uguale distanza verticale dal piano di riferimento al quale è stato attribuito quota zero; se sono sopra il livello del mare si chiamano **isoipse** mentre nel caso contrario sono chiamate isobate.

Esse vengono adottate per rappresentare l'altimetria in una superficie piana, com'è quella di un foglio.

2.2.1. *Suddivisione in bacini idrografici*

Si mostra in figura 21 la suddivisione dei bacini effettuata con *QGIS*:

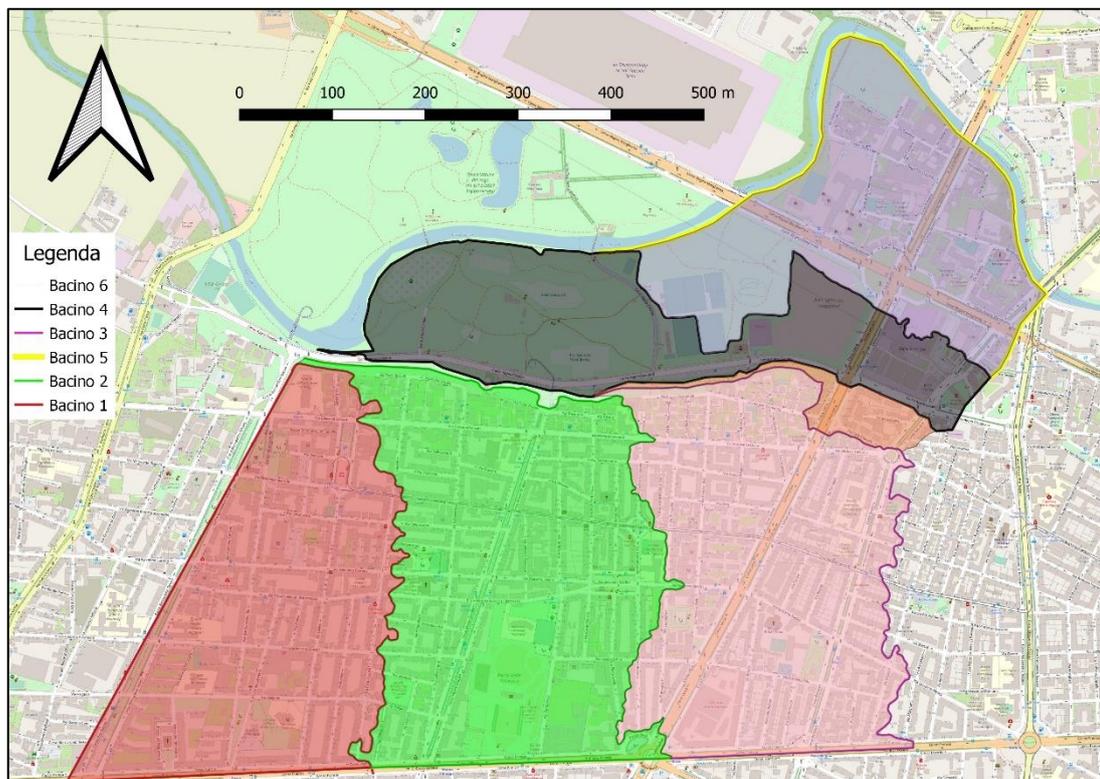


Figura 21: Suddivisione dell'area in bacini idrografici

La suddivisione è stata effettuata mediante interpolazione delle curve di livello.

Tutta l'area che ricade all'interno di ogni singolo bacino idrografico ha delle caratteristiche simili.

Le caratteristiche, in particolare, potrebbero essere suddivise in varie grandezze, quali la pendenza, la morfologia del territorio, l'urbanizzazione, il verde pubblico.

2.3. *Struttura della rete*

2.3.1. *Collettori*

Come primo passo sono stati individuati i **collettori** presenti nell'area oggetto dell'analisi, come mostrato in figura 22:

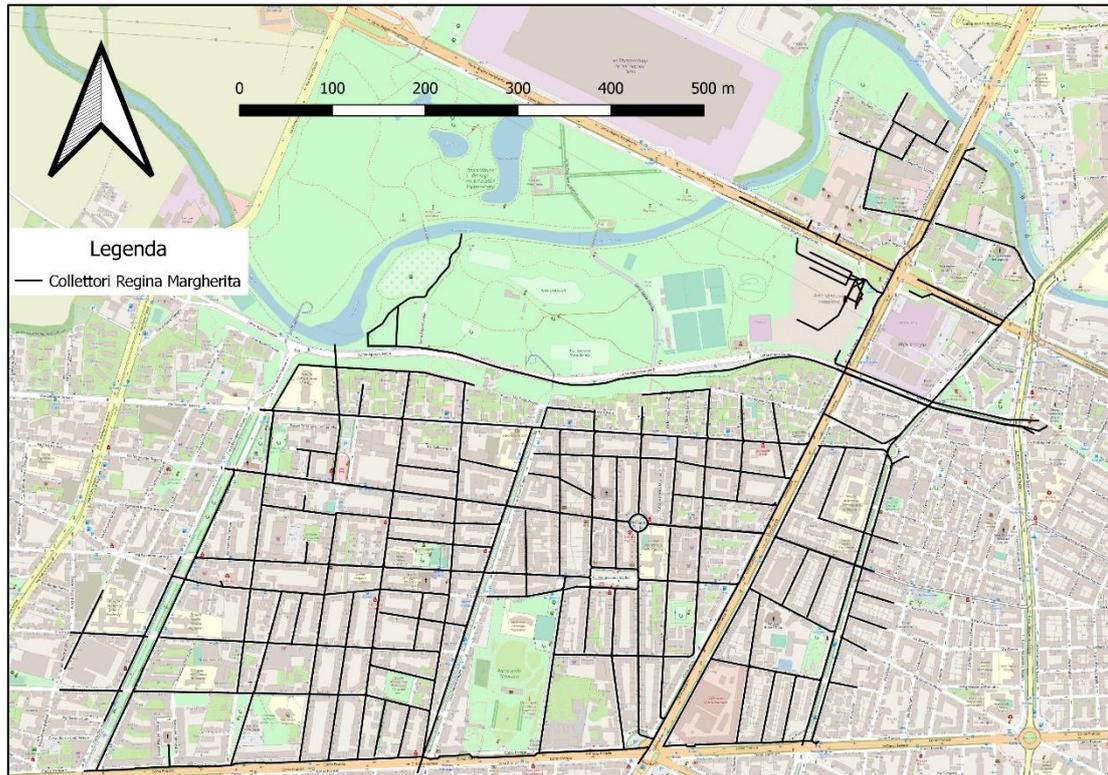


Figura 22: Planimetria dei collettori

L'area oggetto di studio ha i collettori interamente in **calcestruzzo armato** (tranne pochissimi collettori a nord del bacino che sono in PVC) e si riscontrano diverse geometrie, come riportato in tabella 1:

<i>Geometria collettore</i>	<i>Forma collettore</i>
600x900	<i>Ovoidale inglese</i>
700x1050	<i>Ovoidale inglese</i>
700x1100	<i>Ovoidale</i>
700x1200	<i>Ovoidale</i>
800x1400	<i>Ovoidale</i>
$\Phi 400$	<i>Circolare</i>
$\Phi 500$	<i>Circolare</i>
$\Phi 600$	<i>Circolare</i>
$\Phi 800$	<i>Circolare</i>
$\Phi 1000$	<i>Circolare</i>
$\Phi 1500$	<i>Circolare</i>
$\Phi 2000$	<i>Circolare</i>

Tabella 1: Geometria dei collettori

Da segnalare che si parla di sezione standard quando il rapporto tra asse maggiore e asse minore pari a 1.5. A titolo esemplificativo, in figura 23 e in figura 24 si riportano nella seguente pagina le sezioni per un collettore standard e un collettore non standard, estrapolate dal software SWMM.

- **Collettore ovoidale inglese, con sezione 600x900:**

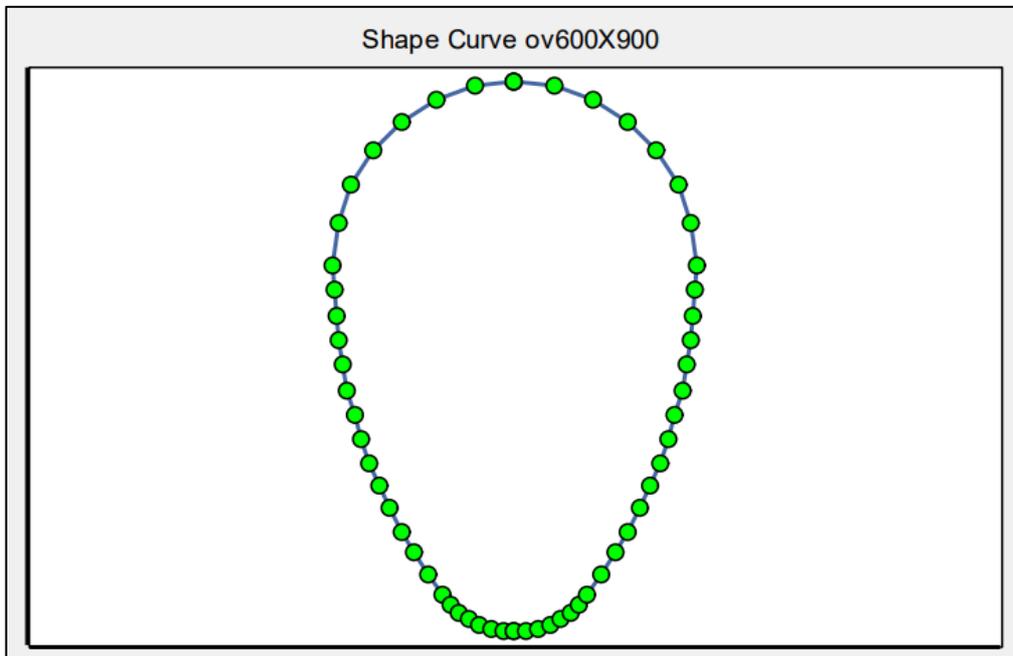


Figura 23: Sezione di un collettore con geometria 600x900

- **Collettore ovoidale inglese, con sezione 700x1200:**

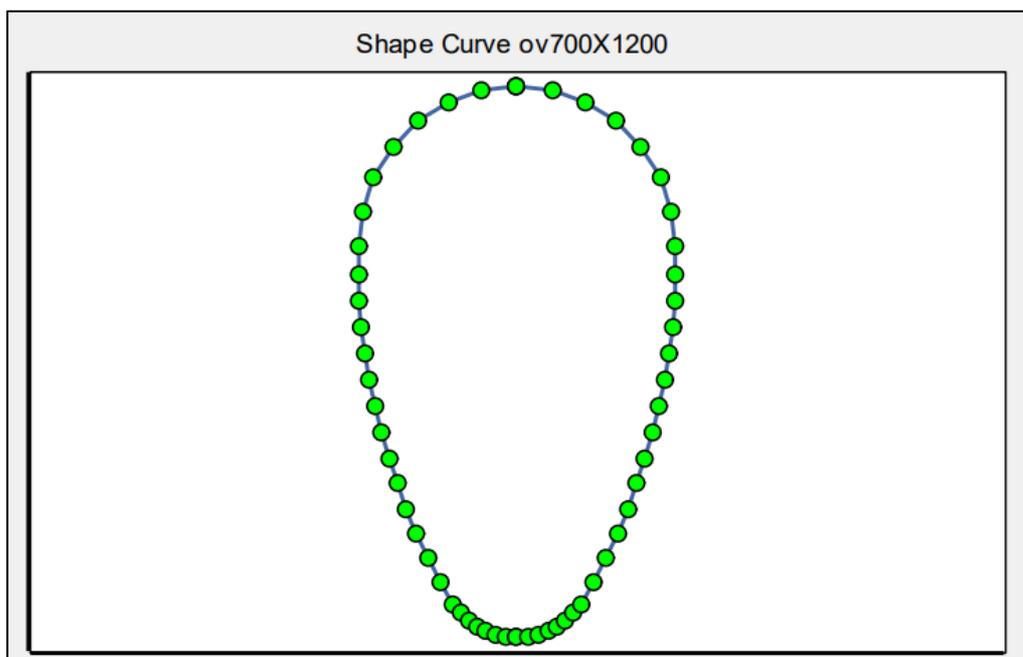


Figura 24: Sezione di un collettore con geometria 700x1200

La struttura della rete è composta come riportato in figura 25:

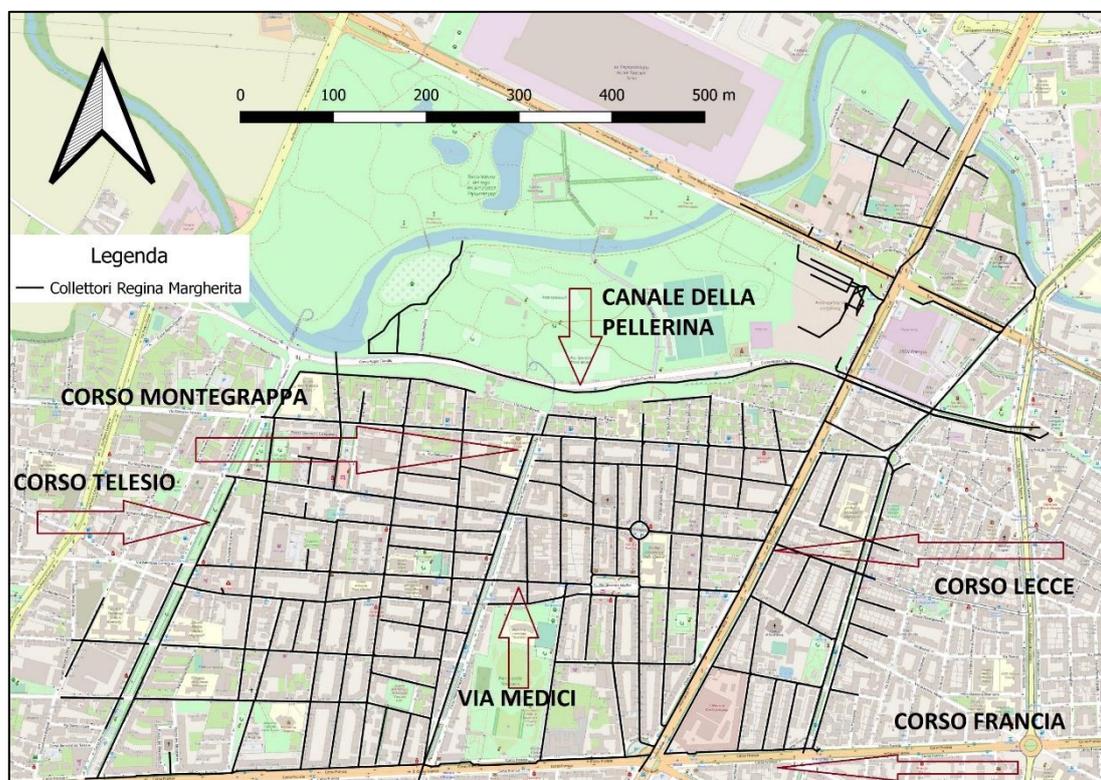


Figura 25: Struttura della rete nel bacino analizzato

Il sistema portante è costituito dai collettori principali che si trovano nei corsi principali sottesi al bacino.

In Corso Lecce sono presenti collettori circolari aventi un diametro di 2 metri.

In Corso Francia sono presenti collettori ovoidali aventi dimensioni di 700x1200 e 700x1100.

In Corso Telesio sono presenti collettori ovoidali 700x1200.

In via Bianchi e in Via Medici sono presenti collettori ovoidali 700x1200.

In Corso Appio Claudio è presente il Canale della Pellerina. Esso è un canale a pelo libero, alternato a dei piccoli tratti interrati con sezione 3000x1400.

Il canale della Pellerina costituiva il primo tratto della grande derivazione che introduceva l'acqua della Dora Riparia in Torino e dava movimento alle ruote idrauliche dei suoi maggiori opifici. Esso traeva origine dallo sbarramento

della Pellerina e raggiungeva il Martinetto. Le funzioni che le erano proprie erano limitate all'irrigazione. Oggi lo sbarramento della Pellerina ha trovato nuovo impiego a vantaggio di una piccola centrale idroelettrica, come mostrato in figura 26.



Figura 26: Vista aerea del Canale della Pellerina [29]

Il deflusso avviene da ovest ad est. L'acqua viene recapitata al bacino adiacente, precedentemente indicato con la lettera L nello stato del progetto.

Il Canale della Pellerina riceve tutta la pioggia che cade nei pressi di Corso Appio Claudio.

2.3.2. Pozzetti

Si riporta la mappa dei pozzetti in figura 27:



Figura 27: Planimetria dei pozzetti

I pozzetti presenti nell'area sono 991.

Di questi 991 pozzetti totali, 25 sono pozzetti di salto.

2.3.3. *Punti di sfocio*

I punti di sfocio del seguente bacino sono due:

- ❖ **Fiume Dora Riparia**
- ❖ **Bacini limitrofi**

In figura 28 si riportano gli sfoci:

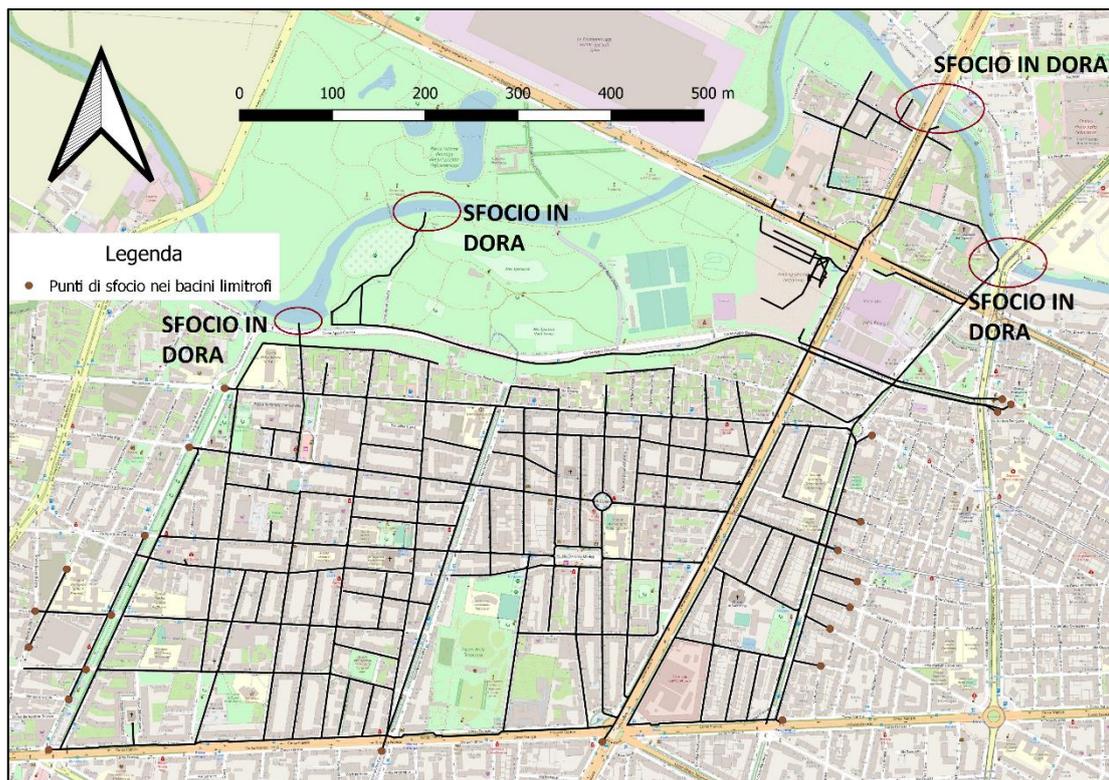


Figura 28: Punti di sfocio del bacino

Lo sfocio sulla Dora Riparia del canale di risalita dell'ittiofauna non è stato modellato su SWMM, in quanto non fa parte della rete di drenaggio.

2.4. Precipitazioni

2.4.1. Precipitazioni a grande scala

I dati sulle precipitazioni sono stati ricavati dall'*Atlante delle piogge intense* dal sito di Arpa Piemonte. Esso è un documento costruito nel 2006 e contiene i dati di pioggia di oltre 500 stazioni in tutto il Piemonte che sono stati interpolati spazialmente su una maglia di 250m di lato. Si mostra in figura 29 l'immagine della zona esaminata tratta dall'Atlante delle piogge intense:

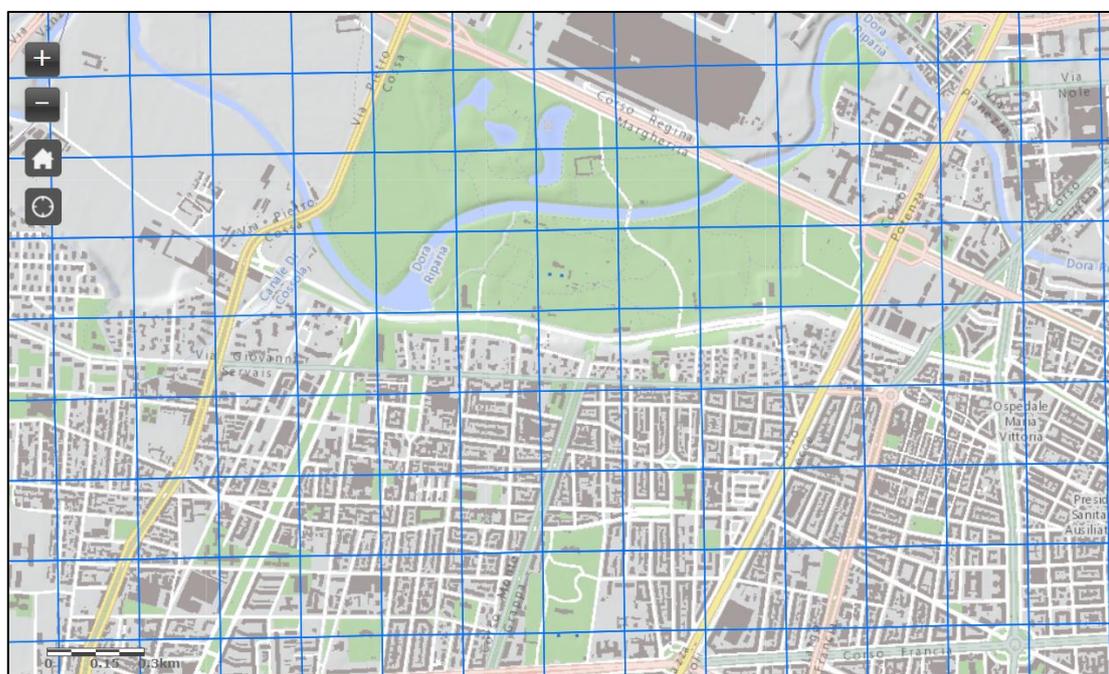


Figura 29: Atlante delle piogge intense [14]

In ogni cella sono contenuti i valori di pioggia suddivisi in base a:

- Tempo di ritorno
- Modello probabilistico

In figura 30 e 31 si mostrano le carte di precipitazione del Comune di Torino calcolate rispettivamente con una pioggia di 1h e con una pioggia di 10 minuti.

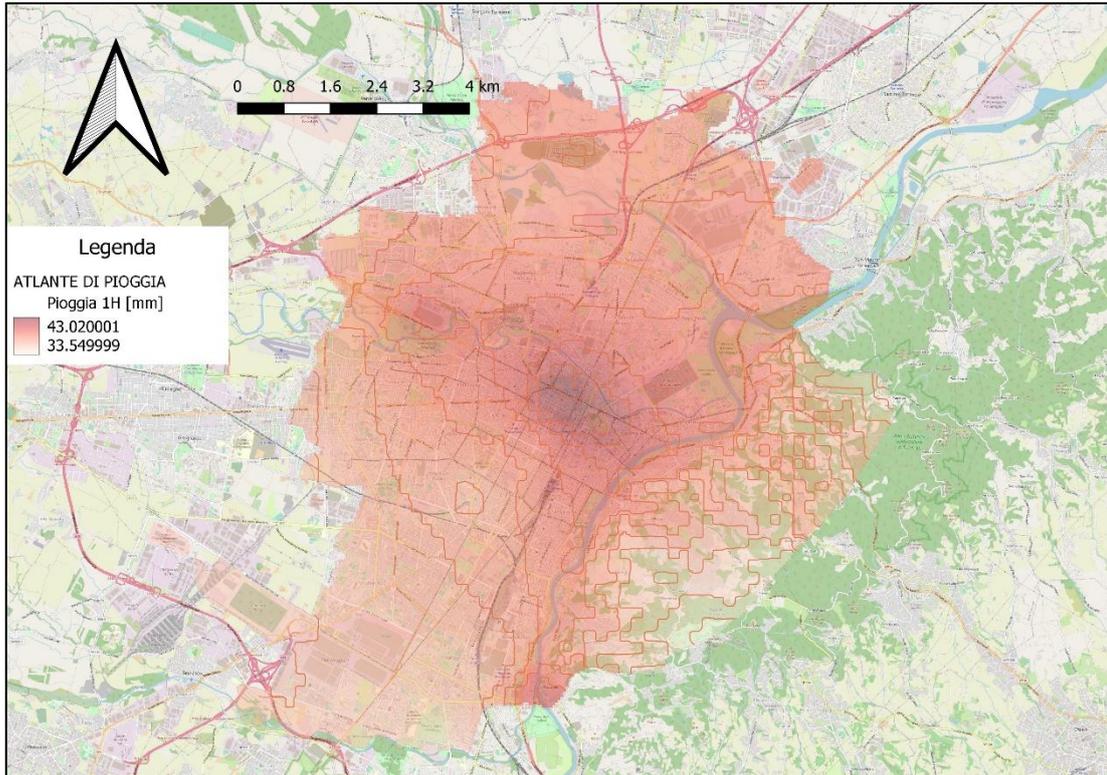


Figura 30: Carta delle precipitazioni per la città di Torino con una pioggia di durata 1 ora

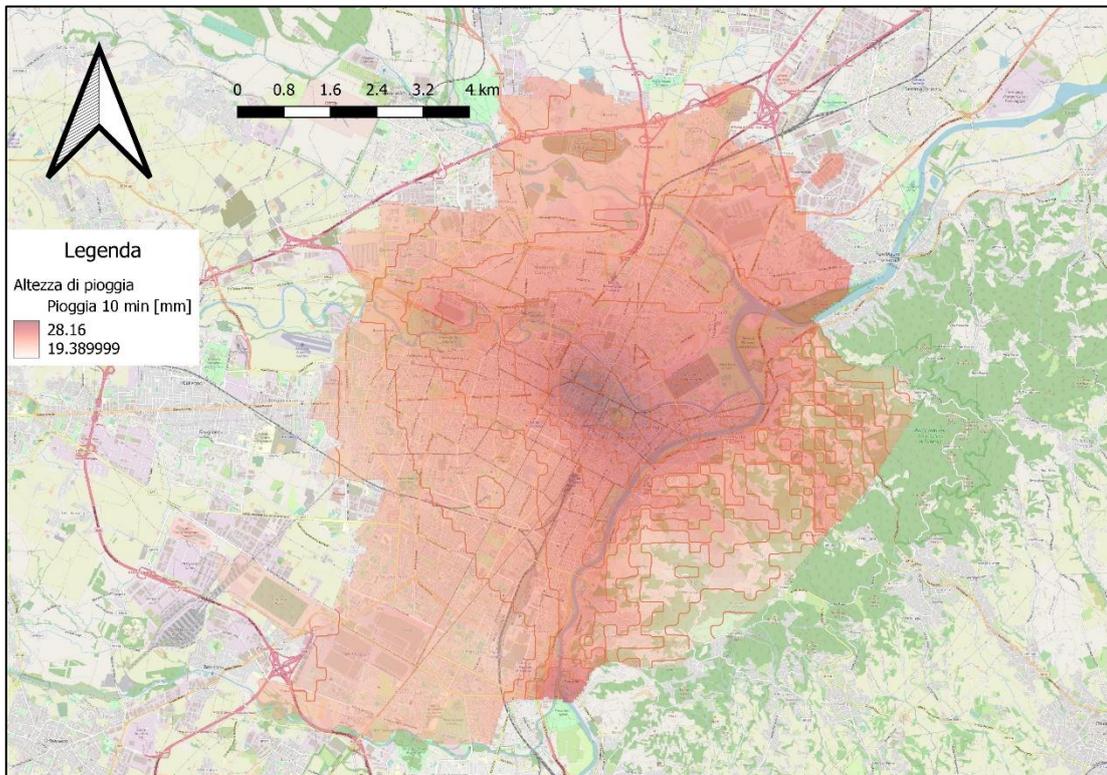


Figura 31: Carta delle precipitazioni per la città di Torino con una pioggia di durata 10 minuti

I modelli probabilistici di riferimento sono 2:

- ❖ *Distribuzione di Gumbel*
- ❖ *Distribuzione GEV*

Si decide di proseguire l'analisi con la distribuzione di Gumbel, in quanto è il modello che simula meglio i fenomeni di pioggia. Si può notare che comunque la distribuzione GEV presenta dati molto simili alla Gumbel.

La distribuzione di Gumbel è un modello dei valori estremi di tipo I (EVI):

$$P(x) = e^{-e^{-\frac{x-\theta_1}{\theta_2}}} \quad (2.1)$$

Con: θ_1 = *parametro di posizione*

θ_2 = *parametro di scala o di dispersione*

Per quanto riguarda il tempo di ritorno, si prosegue con un T_R pari a **5 anni**.

Si prendono come riferimento le piogge di durata breve, in quanto sono quelle che di solito mandano in crisi un sistema fognario. In particolare, si effettuano i calcoli con le piogge di durata **10min** e **1h**.

È interessante notare che all'interno dell'Atlante sono contenute anche le *CPP* (*curve di possibilità pluviometrica*). Esse non sono altro che particolari tipi di curve che esprimono la relazione tra le altezze massime e le durate di pioggia.

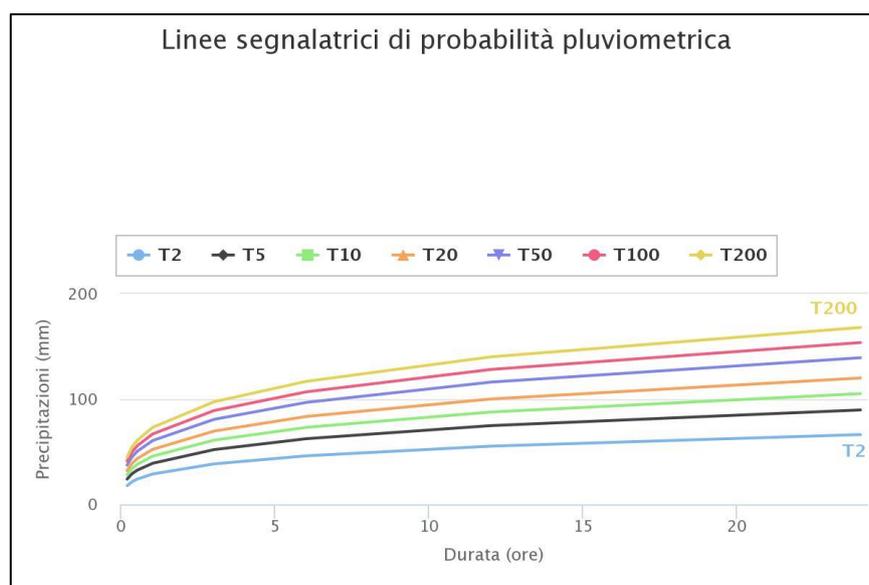


Figura 32: CPP di una singola cella dell'Atlante [14]

2.4.2. *Precipitazioni a scala di bacino*

❖ **Pioggia di 1h**

La variabilità spaziale dell'intensità di precipitazione nella zona considerata è minima, come mostrato in figura 33:



Figura 33: Carta delle precipitazioni a scala di bacino per la pioggia di durata 1 ora

L'intera area si trova in una zona caratterizzata da precipitazione pressoché uniforme.

Considerando che la variabilità spaziale delle piogge è minima, si effettua una media delle piogge sull'intero bacino e si arriva ad una pioggia di intensità pari a **39.1 mm/h**. Si allega in figura 34 lo ietogramma corrispondente:

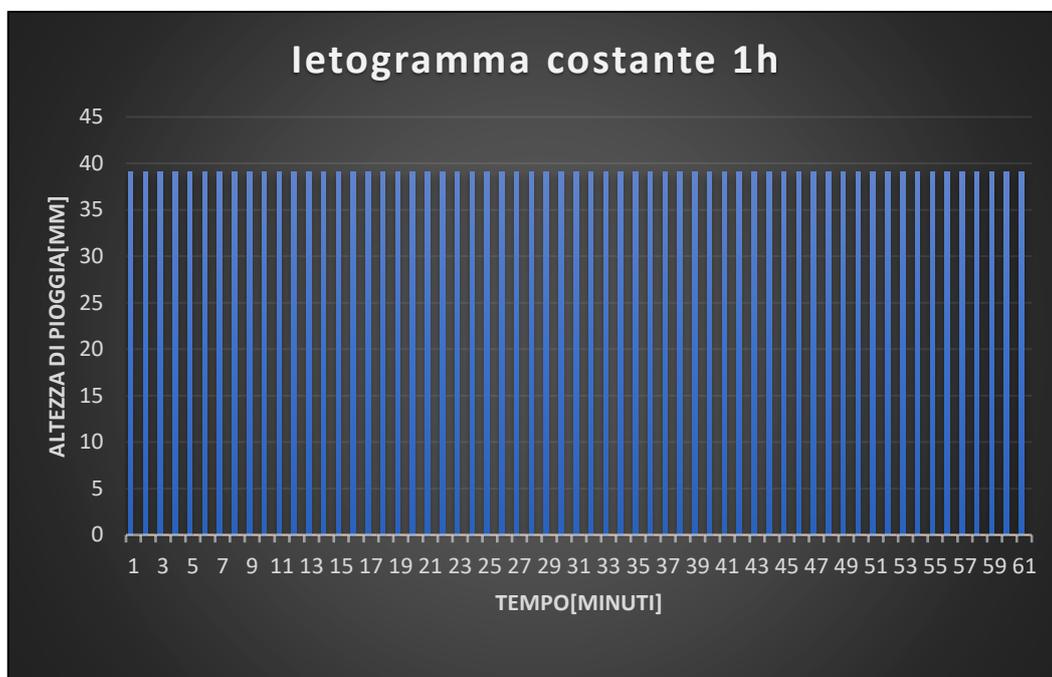


Figura 34: Ietogramma costante per pioggia di durata 1 ora

Si riassumono in tabella 2 i valori caratteristici della piovosità del bacino per la durata di pioggia pari a 1 ora:

Media[mm]	Max[mm]	Min[mm]	Varianza[mm²]	Deviazione standard[mm]
39.1	40.3	37.5	0.486	0.697

Tabella 2: Parametri descrittivi la distribuzione spaziale della pioggia di durata 1 ora

❖ Pioggia di 10min

In figura 35 si riporta una carta delle precipitazioni per la pioggia di durata 10 minuti relativa al bacino oggetto di analisi.

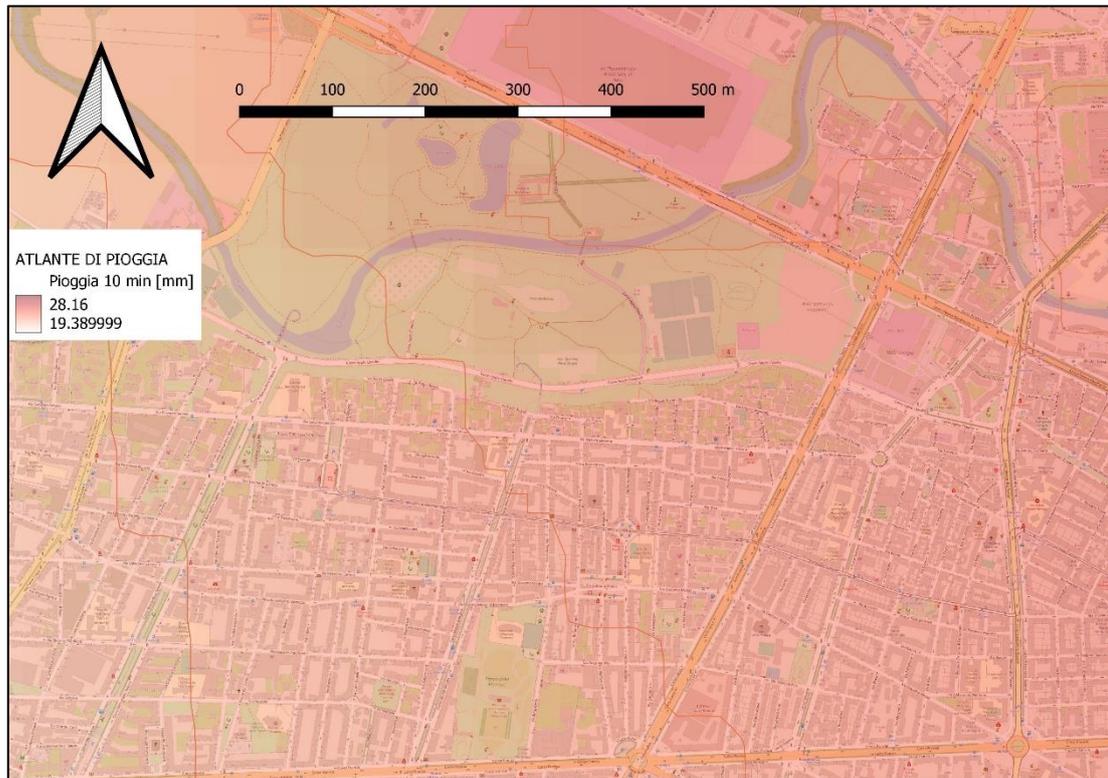


Figura 35: Carta delle precipitazioni a scala di bacino per la pioggia di durata 10 minuti

Con il medesimo procedimento della pioggia di durata 1 ora, si effettua una media sull'intero bacino arrivando ad una pioggia di intensità pari a **24.1 mm/10min** e facendo la conversione: **144.6 mm/h**. Si allega in figura 36 lo ietogramma corrispondente:

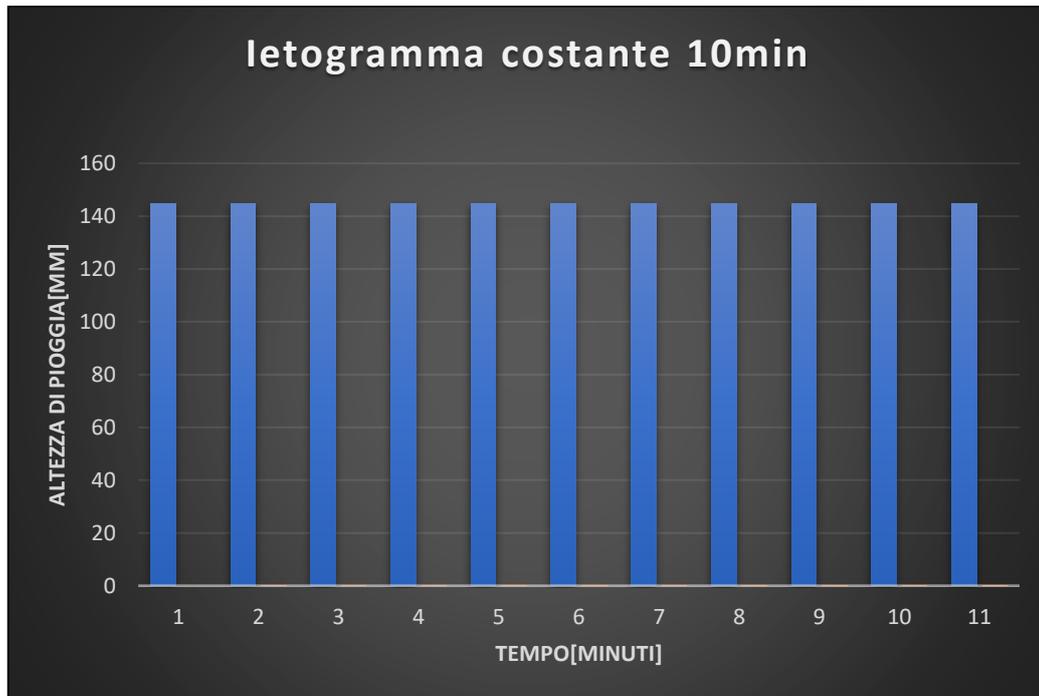


Figura 36: Ietogramma costante per pioggia di durata 10 minuti

Di seguito, in tabella 3 i valori caratteristici della piovosità del bacino per la durata di pioggia pari a 10 minuti:

Media[mm]	Max[mm]	Min[mm]	Varianza[mm ²]	Deviazione standard[mm]
24.1	25.3	22.7	0.424	0.651

Tabella 3: Parametri descriventi la distribuzione spaziale della pioggia di durata 10 minuti

Capitolo III

MODELLAZIONE DELLA RETE CON IL SOFTWARE SWMM

3.1. *Descrizione del software*

SWMM (acronimo di *Storm Water Management Model*) viene utilizzato in tutto il mondo per il dimensionamento, l'analisi e le verifiche relative a:

- reti di deflusso delle acque piovane;
- fogne miste;
- fogne nere;
- altri sistemi di drenaggio in aree urbane.

SWMM è un modello di simulazione afflussi-deflussi dinamico utilizzato sia per il singolo evento di pioggia che la simulazione di lungo periodo temporale nelle aree prevalentemente urbane.

3.1.1. *Genesi del codice*

SWMM è stato sviluppato per la prima volta tra il 1969 e il 1971 e da quegli anni ha subito quattro importanti aggiornamenti. I principali aggiornamenti sono stati: (1) Versione 2 nel 1973-1975, (2) Versione 3 nel 1979-1981, (3) Versione 4 nel 1985-1988 e (4) Versione 5 nel 2001-2004. L'attuale edizione di SWMM, Versione 5/5.1.012, è una riscrittura completa delle precedenti versioni di Fortran nel linguaggio di programmazione C, e può essere eseguita sotto Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8, Windows 10 e anche con una ricompilazione sotto Unix. Il codice per SWMM5 è open source e di pubblico dominio codice scaricabile dal sito EPA.

EPA SWMM 5 fornisce un ambiente grafico integrato per la modifica dei dati di input dei bacini idrografici, l'esecuzione di simulazioni idrologiche, idrauliche, di controllo in tempo reale e della qualità dell'acqua e la visualizzazione dei risultati in una varietà di formati grafici. Questi includono mappe tematiche dell'area di drenaggio codificate a colori, grafici e tabelle di serie temporali, grafici di profilo, grafici a dispersione e analisi di frequenza statistica.

L'ultima riscrittura di *EPA SWMM* è stata prodotta dalla Water Supply and Water Resources Division del National Risk Management Research Laboratory della US Environmental Protection Agency con l'assistenza della società di consulenza di CDM Inc nell'ambito di un accordo di ricerca e sviluppo cooperativo (CRADA). *SWMM 5* viene utilizzato come motore di calcolo per molti pacchetti di modellazione, inoltre i componenti di *SWMM5* sono in altri pacchetti di modellazione.

3.1.2. *Modello concettuale*

SWMM concettualizza un sistema di drenaggio come una serie di flussi di acqua e materiale tra diversi grandi comparti ambientali. Questi scomparti e gli oggetti *SWMM* che contengono includono:

- Il compartimento dell'atmosfera, da cui cadono le precipitazioni e gli inquinanti si depositano sul compartimento della superficie terrestre. *SWMM* utilizza oggetti Rain Gage per rappresentare gli input di pioggia al sistema. Gli oggetti pluviometro possono utilizzare serie temporali, file di testo esterni o file di dati sulle precipitazioni NOAA. Gli oggetti Rain Gage possono utilizzare le precipitazioni per migliaia di anni.
- Il compartimento della superficie terrestre, che è rappresentato da uno o più oggetti del sottobacino. Riceve precipitazioni dal Comparto Atmosferico sotto forma di pioggia o neve; invia il deflusso sotto forma di infiltrazione al Comparto Acque sotterranee ed anche come deflusso superficiale e carichi inquinanti al Comparto Trasporti.
- Il comparto delle acque sotterranee riceve l'infiltrazione dal comparto Terrestre e trasferisce una parte di tale afflusso al comparto dei Trasporti. Questo compartimento è modellato utilizzando oggetti acquiferi. La connessione al vano di trasporto può essere un confine statico o una profondità dinamica nei canali. I collegamenti nel compartimento di trasporto ora hanno anche infiltrazioni ed evaporazione.
- Il compartimento di trasporto contiene una rete di elementi di trasporto (canali, tubi, pompe e regolatori) e unità di stoccaggio/trattamento che trasportano l'acqua agli scarichi o agli impianti di trattamento. Gli afflussi a questo compartimento possono provenire dal deflusso superficiale, dall'interflusso di acque

sotterranee, dal flusso di tempo secco sanitario o da idrografi definiti dall'utente. I componenti del vano Trasporto sono modellati con oggetti Nodo e Collegamento.

Non tutti i compartimenti devono apparire in un particolare modello SWMM.

Si riassume in figura 37, quanto appena detto, con un'immagine esplicativa:

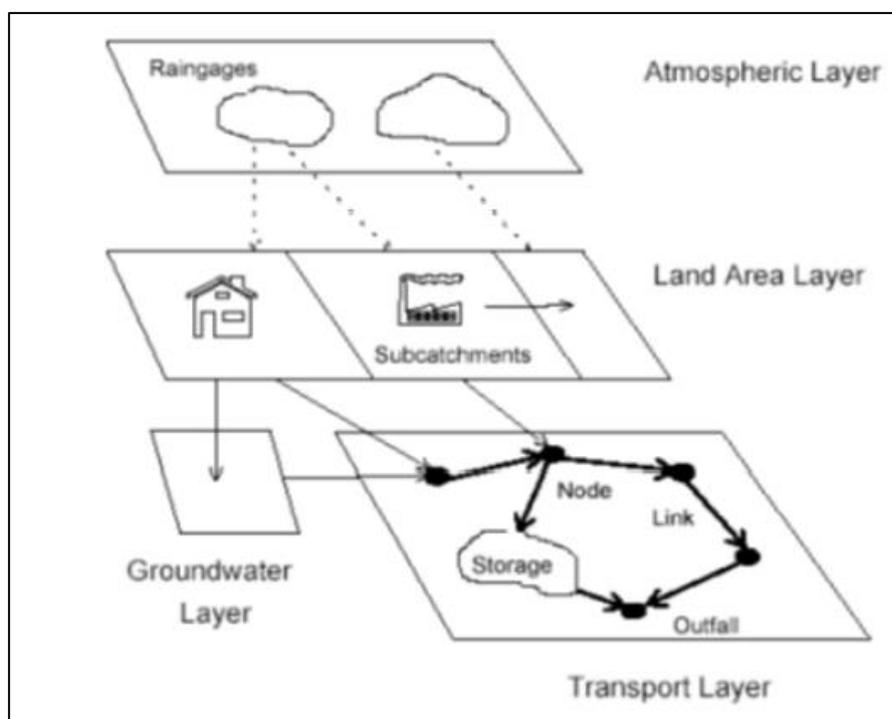


Figura 37: Concettualizzazione di SWMM [2]

3.1.3. Descrizione dei moduli di SWMM

In SWMM, nella fase iniziale di dimensionamento si inseriscono i dati caratterizzanti l'orografia del territorio, la rete di drenaggio e gli eventi atmosferici. All'avviamento del software si presenta l'interfaccia riportata in figura 38, in cui sono presenti i comandi principali per la realizzazione del modello.

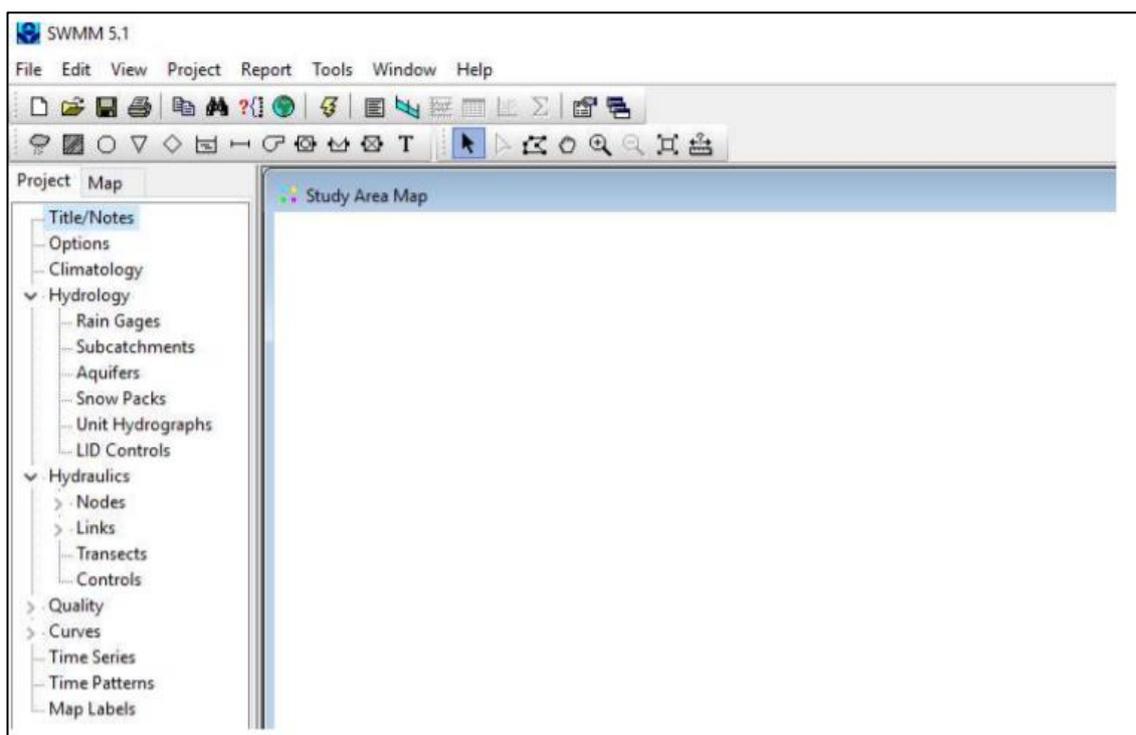


Figura 38: Interfaccia di SWMM

Il programma è suddiviso in 3 moduli di progetto principali, come riportato in figura 39:

- Modulo idrologico (Hydrology)
- Modulo idraulico (Hydraulics)
- Modulo di qualità (Quality)

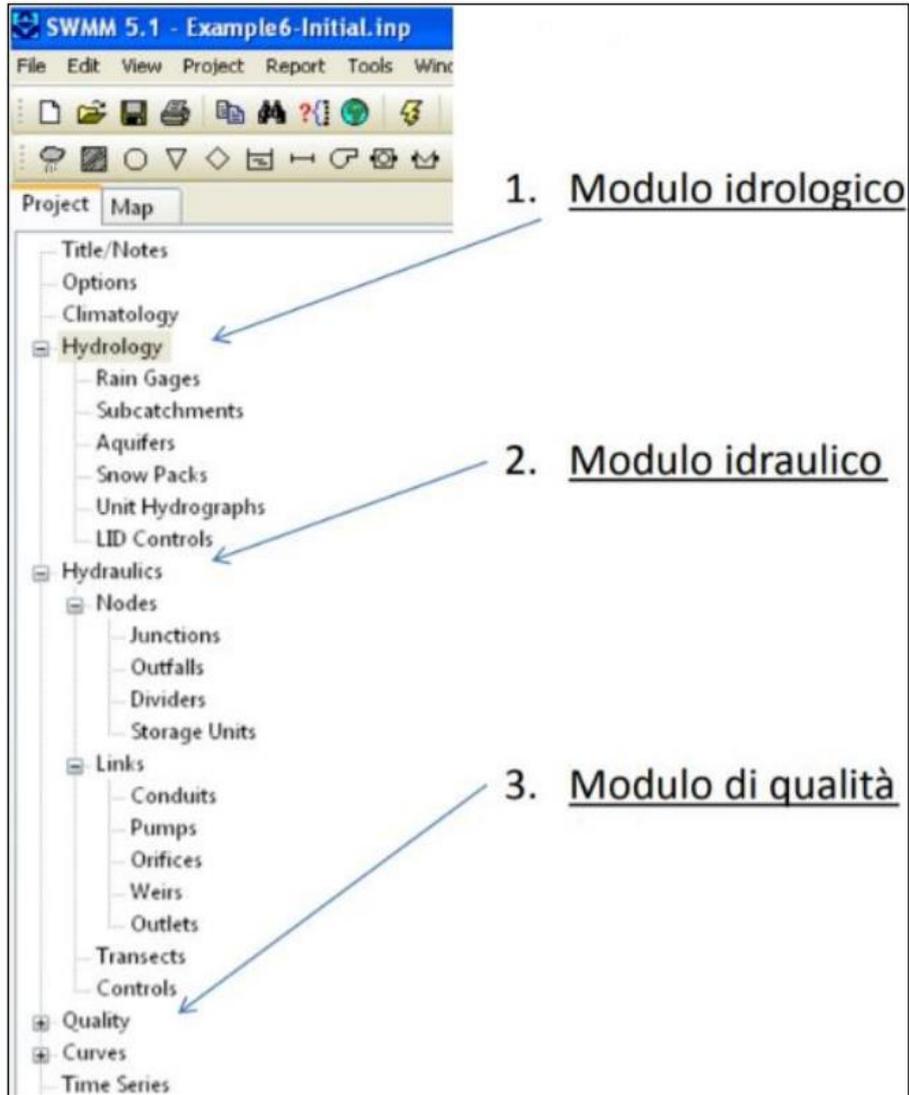


Figura 39: I moduli di SWMM [3]

3.1.3.1. Modulo idrologico

Il modulo idrologico descrive il territorio come un insieme di sottobacini, valutando le portate prodotte da un determinato evento atmosferico. Al suo interno si trovano i seguenti comandi:

-  Pluviometro (Rain Gage): serve per definire l'intensità della pioggia in funzione del tempo. Queste informazioni possono essere fornite sia sottoforma di serie temporali determinate dall'utente o attraverso dei file esterni.
-  Sottobacini (Subcatchments): sono delle porzioni di territorio, che grazie agli elementi topografici e al sistema fognario dirigono il deflusso verso un punto di uscita, che può essere sia un nodo della rete o un altro subcatchment. L'utente decide come dividere l'area di studio e quale sarà il punto di uscita di ogni sottobacino. A sua volta, ogni subcatchment viene suddiviso in porzioni permeabili e impermeabili, in cui il deflusso potrà o meno infiltrarsi. L'infiltrazione può essere calcolata scegliendo tra il modello di Horton, Horton modificato, Green-Ampt, Green-Ampt modificato e il metodo del Curve Number. I parametri che l'utente deve assegnare per la corretta definizione del subcatchment sono: evento di pioggia (rain gage), nodo o subcatchment di uscita, impermeabilità, pendenza e numero di Manning (sia per la parte impermeabile che permeabile).
- Acquiferi (Aquifers): sono una porzione del sottosuolo che ricevono le infiltrazioni dal sottobacino sopra di essi e scambiano il flusso delle acque sotterranee con un nodo del sistema di trasporto.
- Accumulo di neve (Snow Packs): è la neve accumulata che copre un sottobacino.
- Unità idrografiche (Unit Hydrographs): sono una funzione di risposta che descrivono la quantità di afflusso/infiltrazione di fognature generata nel tempo per unità di pioggia istantanea.
- Controlli LID (LID Controls): l'acronimo LID sta per low-impact development (sviluppo a basso impatto). Rappresentano l'insieme di strategie e tecniche adottate nella gestione sostenibile delle acque meteoriche. Il loro scopo è quello di controllare le acque di pioggia tramite tecnologie a basso impatto che imitano i normali processi naturali e che mirano al mantenimento del regime idrico presente prima dell'urbanizzazione. Tra le varie tecnologie utilizzate per ridurre il deflusso superficiale attraverso una maggiore infiltrazione vi

sono: le aree di bioretensione, le pavimentazioni porose o i ricoprimenti vegetativi e i sistemi di trincea.

3.1.3.2. Modulo idraulico

Il modulo idraulico permette il trasporto dell'acqua tramite una rete costituita da collettori, vasche, canali a pelo libero, sfioratori e impianti di pompaggio. Gli elementi che fanno parte del modulo sono riportati sotto:

-  Giunzioni (Junctions Nodes): definiscono i punti dove i "links" (condotte, canali e tubazioni) si uniscono. Per descriverli è opportuno definire: invert elevation (elevazione dal fondo del canale o tombino), altezza dalla superficie del terreno, superficie inondata durante l'allagamento e i dati di afflusso esterno.
-  Scarichi (Outfalls): rappresentano i nodi terminali della rete dai quali l'acqua viene scaricata e convogliata in un corpo recettore con elevazione della superficie dell'acqua nota. Al contrario delle giunzioni gli outfalls possono essere collegati ad una sola condotta.
-  Separatori di portata (Dividers Nodes): sono elementi, del sistema di trasporto, che consentono di dividere la portata in due condotti distinti. Possono avere al più due elementi collegati sul lato di scarico. Questi particolari nodi vengono considerati tali solo nel caso del modello dell'onda cinematica con flusso costante mentre vengono ridotti a delle semplici giunzioni nel caso del modello dell'onda dinamica. In base a come vengono deviati gli afflussi, esistono quattro diversi tipi di deviatori di flusso: cutoff divider, tabular divider, overflow divider e weir divider.

La portata che viene deviata attraverso i separatori è calcolata così:

$$Q_{div} = C_w \left[\frac{Q_{in} - Q_{max}}{Q_{max} - Q_{min}} H_w \right]^{1.5}$$

(3. 1)

Avendo indicato con:

C_w = coefficiente di sbarramento

Q_{in} = afflusso nel divisore

Q_{min} = valore di portata per cui inizia la deviazione

H_w = altezza di sbarramento

$Q_{max} = C_w H_w^{1.5}$.

-  Unità di Stoccaggio (Storage Units): sono nodi del sistema di drenaggio che garantiscono un volume di accumulo (stagni, laghi, ecc.). Possono riprodurre sia delle strutture di stoccaggio molto piccole che molto grandi. Oltre a consentire l'entrata e lo scarico dell'acqua, essi considerano anche l'evaporazione superficiale e l'infiltrazione nel suolo.
-  Pompe (Pumps): sono degl'impianti adottati per sollevare l'acqua a quote più elevate. Infatti, può capitare che non sia possibile, per diverse ragioni, costruire delle fognature che funzionino a gravità. Il software *SWMM* supporta cinque diversi tipi di funzionamento della pompa.
-  Condotti (Conduits): sono dei tubi o canali che trasportano l'acqua da un nodo ad un altro. Possono avere le più svariate geometrie: circolare, rettangolare, trapezoidale, triangolare, ellittica, ad arco, parabolica, a ferro di cavallo, irregolare... Ma solitamente la maggior parte dei tubi di drenaggio sono circolari e i canali di scolo hanno tradizionalmente forme ellittiche o ad arco. Per il calcolo della portata nei condotti, il programma *SWMM* si serve dell'equazione di Manning:

$$Q = \frac{1.49}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

(3.2)

dove: Q è la portata che circola nella condotta, A è l'area della sezione trasversale, R è il raggio idraulico, S è la pendenza, n è il coefficiente di Manning. La pendenza S , a seconda del modello di flusso utilizzato, viene considerata come pendenza della condotta o pendenza della perdita di carico dovuta all'attrito.

In figura 40 si vedono le possibili geometrie dei collettori.

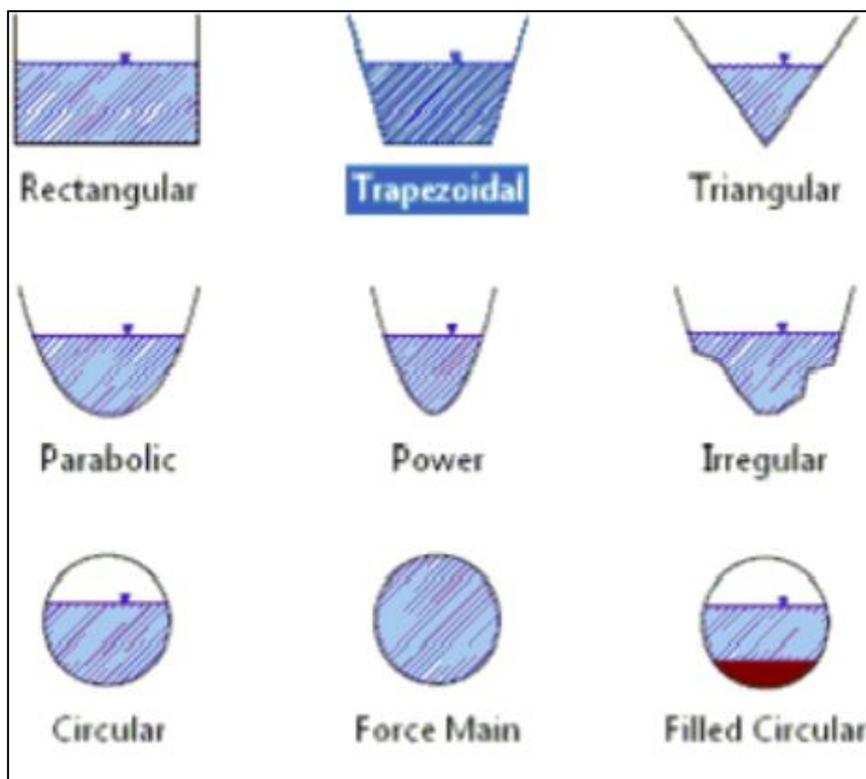


Figura 40: Geometria delle condotte su SWMM [19]

-  Orifizi (Orifices): sono sistemi che hanno il compito di modellare le strutture di scarico e di deviazione nei sistemi di drenaggio dirigendo e regolando il flusso tra due nodi del sistema di trasporto. Nel programma, essi, fungono da collegamento tra due nodi e possono avere forma rettangolare o circolare ed essere posizionati in basso o a lato del nodo a monte. La portata attraverso un orifizio che risulta essere completamente aperto viene calcolata come:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

(3.3)

con: Q è la portata, C è il coefficiente di scarico, A è la sezione dell'apertura dell'orifizio, g è l'accelerazione di gravità, h è la differenza di carico tra il nodo di valle e quello di monte.

-  Sbarramenti (Weirs): sono sistemi che permettono di modellare gli scolmatori/sbarramenti posizionati all'interno della rete di drenaggio (in un tombino o lungo il lato di un canale) o nei serbatoi. Allo stesso modo degli orifizi, rappresentano un collegamento per incanalare e regolare il flusso tra due nodi del sistema di trasporto. Talvolta si possono verificare delle inversioni di flusso per cui può essere necessario inserire una valvola di non ritorno. Nel software esistono cinque differenti tipologie di sbarramenti, ognuno dei quali ha una relazione differente per il calcolo della portata.

-  Uscita (Outlet): sono dei dispositivi che controllano la portata in uscita dai serbatoi di accumulo, dotati in alcuni casi di una valvola, per limitare il flusso in una sola direzione. Essi sono rappresentati nel software come collegamento tra due nodi.

3.1.3.3. *Modulo di qualità*

Il modulo qualità può definire uno o più inquinanti presenti nei subcatchments, valutandone l'origine e la propagazione lungo la rete.

- Con il comando Inquinanti (Pollutants), SWMM riesce a simulare l'origine e il percorso intrapreso da ogni contaminante che viene presentato. Per la loro definizione è necessario stabilire l'unità di misura, la concentrazione nelle piogge, nelle acque sotterranee e in quelle superficiali. L'accumulo e il dilavamento di inquinanti sono funzione degli usi del suolo.

- Usi del suolo (Land Uses) sono delle caratteristiche che vengono assegnate ai subcatchments. Alcuni esempi sono suoli residenziali, commerciali, industriali e non sviluppati. Tali informazioni vengono valutate esclusivamente per tener conto della variazione spaziale dell'accumulo di inquinanti.

Si mostra in figura 41 un'immagine esplicativa del modello concettuale usato da SWMM:

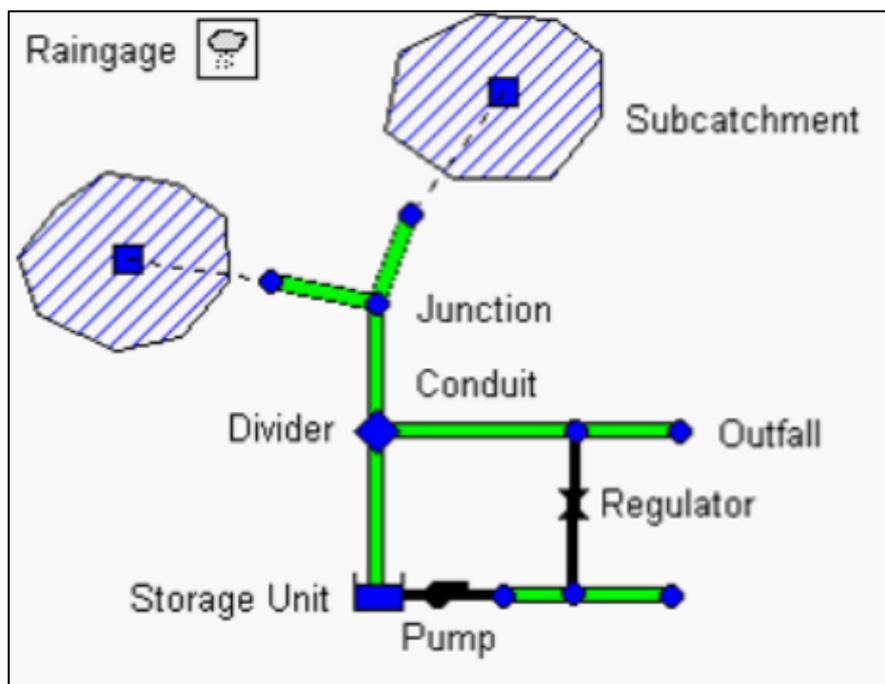


Figura 41: Il modello adottato da SWMM per un sistema di drenaggio [19]

3.1.4. Infiltrazione

I processi relativi alla trasformazione afflussi/deflussi sono:

- 1) Separazione tra infiltrazione(a) e ruscellamento superficiale(b).
- 2a) Acqua infiltrata=movimento di acqua nel suolo.
- 2b) Acqua che non riesce a infiltrarsi=acqua che va a finire lungo i versanti.
- 3a) Dopo che l'acqua è in movimento nel suolo, si deve capire in che modo può essere persa, ossia valutare l'evapotraspirazione, infiltrazione profonda e deflusso sub-superficiale.
- 3b) Trasferimento della massa liquida lungo il reticolo idrografico.

Se l'acqua viene associata ad un fattore di rischio allora ci si può disinteressare del percorso (a), altrimenti se l'acqua viene vista come risorsa idrica, allora ci si deve interessare al percorso (b).

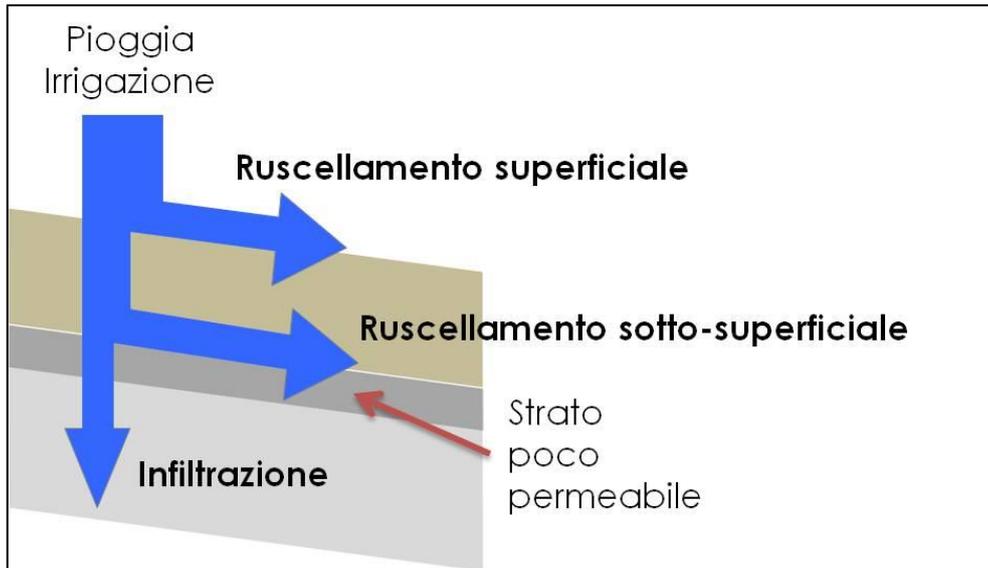


Figura 42: Separazione tra infiltrazione e ruscellamento [52]

L'equazione di bilancio (in assenza di evapotraspirazione e accumulo) dice:

$$i(t) = i_N(t) + f(t) \quad \left[\frac{mm}{h} \right] \quad (3.4)$$

Con $i_N(t)$ = ruscellamento superficiale o intensità di pioggia netta

$f(t)$ = infiltrazione

Si potrebbe scrivere l'equazione anche in funzione dell'altezza di pioggia:

$$h(t) = h_N(t) + F(t) \quad [mm] \quad (3.5)$$

Ma cosa accade all'acqua che si è infiltrata?

Si effettua un'altra equazione di bilancio idrologico, prendendo un volume di controllo di altezza pari a Z_R :

$$Z_R \cdot \frac{d\theta}{dt} = f(t) - e_t(t) - d_{profonda}(t) \pm d_{laterale}(t) \quad (3.6)$$

In cui θ = contenuto idrico del suolo [-]

$d_{profonda}$ = infiltrazione profonda

e_t = evapotraspirazione

$d_{laterale}$ = deflusso sub-superficiale

SWMM consente all'utente di scegliere tra cinque dei metodi più utilizzati: il metodo di Horton, il metodo di Horton modificato, il metodo Green-Ampt, il metodo di Green-Ampt modificato, il metodo del Curve Number. A prescindere da quale metodo di infiltrazione si utilizzi, i parametri che definiscono il metodo dipendono fortemente dal tipo di terreno e dalle condizioni dello stesso da infiltrare. Il NRCS (Natural Resources Conservation Service, precedentemente Soil Conservation Service o SCS) ha classificato la maggior parte dei suoli in gruppi idrologici: A, B, C e D, e a seconda della loro capacità d'infiltrazione. I terreni sabbiosi ben drenati ricadono nel gruppo "A"; i terreni argillosi scarsamente drenati rientrano nel gruppo "D". Si riporta in figura 43 la classificazione dei gruppi idrici del suolo.

Gruppo	Significato
A	Basso potenziale di deflusso. Terreni con alti tassi di infiltrazione anche se completamente bagnati e costituiti principalmente da sabbie o ghiaie profonde e ben drenate.
B	Terreni con tassi di infiltrazione moderati se completamente bagnati e costituiti principalmente da terreni moderatamente profondi fino a terreni profondi, da moderatamente drenati a ben drenati con trame da moderatamente fini a moderatamente grossolane.
C	Terreni con tassi di infiltrazione lenti quando completamente bagnati e costituiti principalmente da terreni con uno strato che impedisce il movimento verso il basso dell'acqua o terreni con trame moderatamente fini oppure fini.
D	Alto potenziale di deflusso. Terreni con tassi di infiltrazione molto lenti quando completamente bagnati e costituiti principalmente da terreni argillosi con un alto potenziale di gonfiore, terreni con una tavola d'acqua alta permanente, terreni con una padella di argilla o strato di argilla o vicino alla superficie, e terreni poco profondi su materiale quasi impermeabile.

Figura 43: Classificazione dei gruppi idrici del suolo [12]

3.1.4.1. Metodo di Horton

È il metodo più conosciuto e sicuramente uno dei più usati. Il metodo di Horton è applicabile solo per eventi per i quali la precipitazione supera la capacità di filtrazione, anche se la forma modificata di questo modello, utilizzata in SWMM, permette di superare questa limitazione.

Siccome il metodo di Horton si basa su osservazioni empiriche, le quali dimostrano che l'infiltrazione nel caso di una precipitazione sufficientemente prolungata diminuisce esponenzialmente da un tasso iniziale massimo ad un tasso minimo, allora lo stesso Horton propose la seguente equazione esponenziale per prevedere la riduzione della capacità di infiltrazione nel tempo, come osservato dalle misurazioni sul campo:

$$f_p = f_\infty + (f_0 - f_\infty) \cdot e^{-k_a \cdot t} \quad (3.7)$$

dove:

- f_p è la capacità di infiltrazione nel suolo (ft/sec);
- f_∞ è il valore minimo di f_p all'istante di tempo infinito (ft/sec);
- f_0 è il valore massimo o iniziale di f_p all'istante di tempo iniziale (ft/sec);
- t è il tempo dall'inizio dell'evento temporalesco (sec);
- k_a è il coefficiente di decadimento (sec^{-1}).

In figura 44 si mostra un grafico contenente la teoria di Horton.

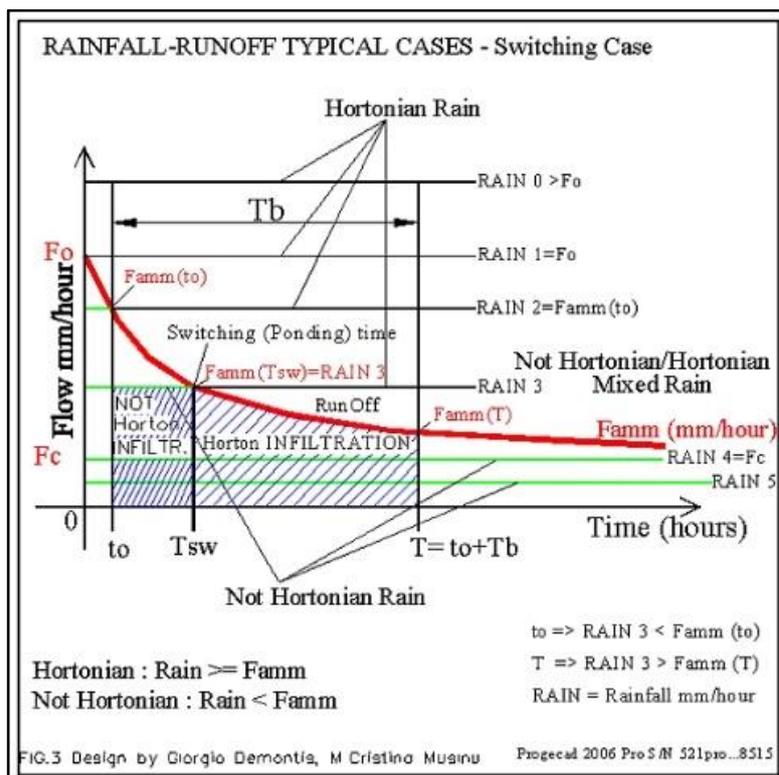


Figura 44: Grafico rappresentante il metodo di Horton [24]

3.1.4.2. Metodo di Horton modificato

Akan sviluppò una versione modificata del metodo di infiltrazione di Horton (Akan, 1992; Akan e Houghtalen, 2003) che è stato aggiunto come opzione di infiltrazione separata in SWMM 5. Il metodo utilizza gli stessi parametri del metodo originale ma, invece di tenere traccia del tempo lungo la curva di decadimento di Horton, utilizza il volume cumulativo di infiltrazione superiore al tasso minimo di infiltrazione come variabile di stato. Si presume, quindi, che parte dell'acqua infiltrata percola più in profondità nel terreno al tasso di infiltrazione minimo. Di conseguenza, è la differenza tra i tassi di infiltrazione effettivi e minimi che si accumulano appena sotto la superficie che provocano la capacità di infiltrazione per diminuire col tempo. Questo metodo è richiesto per dare stime di infiltrazione più accurate quando si verificano intensità di precipitazioni basse.

Si mostrano in tabella 4 alcuni parametri di Horton usati nel modello.

		f_0 [mm/h]	f_c [mm/h]	k [1/h]
Manuale ASCE	Suoli molto permeabili	117	17	5.34
	suoli mediamente permeabili	76	13	4.14
	suoli scarsamente permeabili	76	6	4.14
SCS (1956)	Suolo A	250	25.4	2
	Suolo B	200	12.7	2
	Suolo C	125	6.3	2
	Suolo D	76	2.5	2
Horton (1940)	Standard Agricultural (bare)	289.56	6.1- 226.06	96
	Standard Agricultural (bare)	932.18	208.28- 299.72	48
	Peat	337.82	20.83- 299.72	108
	Fine sandy clay (turfed)	218.44	20.83- 25.40	120
	Fine sandy clay (bare)	695.96	104.14- 30.48	84
Butler & Davis (2011)	Coarse textured soil	250	25	2
	Medium textured soil	200	12	2
	Fine textured soil	125	6	2
	Clays/paved soils	75	3	2

Tabella 4: Parametri di Horton

I suoli A, B e C sono evidenziati in rosso in quanto sono quelli che si sono adottati nel modello SWMM.

3.2. Modellazione della rete

Descritto il codice di calcolo si procede alla rappresentazione di come è stato creato il modello con i relativi parametri.

I parametri che verranno descritti non sono stati calibrati perché nel bacino non è presente un misuratore di portata, ma sono stati presi da tabelle, ma si ritengono affidabili perché sono già stati testati in altri bacini modellati nell'ambito di questo progetto.

3.2.1. Suddivisione in sottobacini

Per poter importare il modello su *SWMM*, è necessario ancora suddividere ulteriormente i 6 bacini idrografici in più **sottobacini(sub-catchments)**. Il criterio usato per fare questa operazione è il *metodo dei topoieti (o dei poligoni di Thiessen)*.

Il metodo dei topoieti è uno strumento usato in idrologia per l'interpolazione spaziale delle precipitazioni, ma adesso il suo utilizzo è solo per identificare delle aree di competenza di ogni collettore.

L'area di interesse è divisa in n aree di influenza, una per ogni stazione di misura. Il metodo consiste nell'unire con segmenti tutte le stazioni tra loro contigue situate all'interno del bacino o nelle sue immediate vicinanze, così da ottenere un reticolo a maglie triangolari, e nel tracciare quindi le perpendicolari ai segmenti nel punto medio. Le perpendicolari individuano dei poligoni irregolari, ciascuno dei quali contiene una stazione di misura situata in prossimità del centro. E' da notare che l'individuazione dei poligoni non è univoca, perché la costruzione del reticolo a maglie triangolari si può effettuare in diversi modi (come regola si fa in modo che i triangoli abbiano il minor perimetro).

In figura 45 si mostra un esempio di applicazione del metodo dei topoieti.

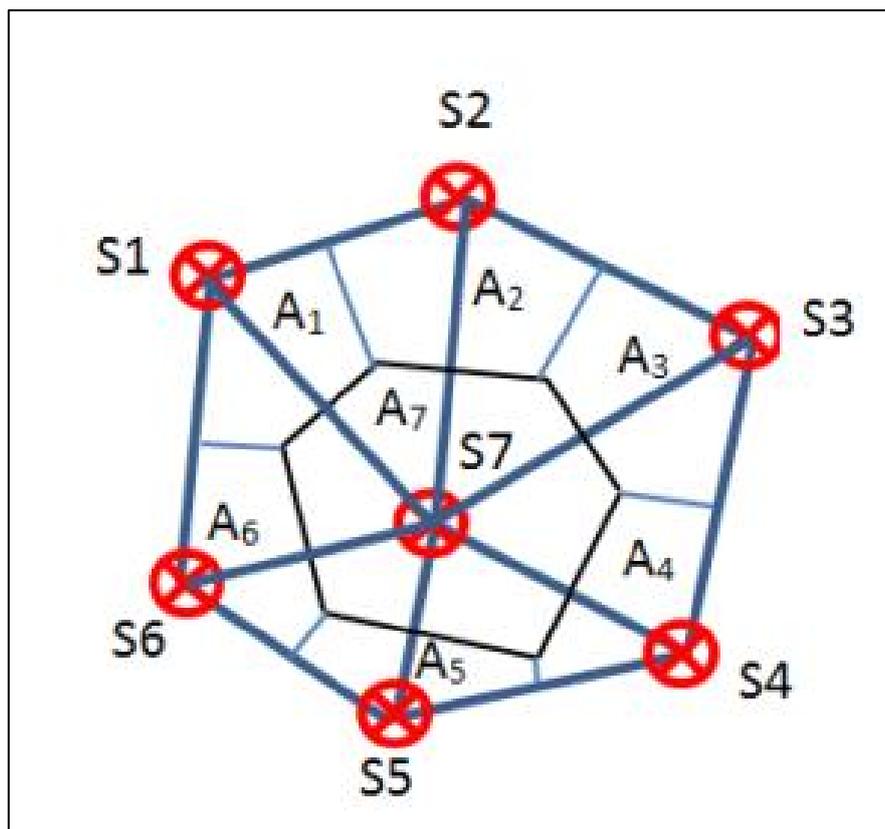


Figura 45: Esempio di applicazione del metodo dei topoieti [9]

In questo caso, per suddividere i 6 bacini idrografici in più sottobacini, il metodo dei topoieti va applicato **confrontando i topoieti relativi ai pozzetti e l'orografia del terreno** (considerando le principali direzioni di drenaggio dell'acqua) descritta dai bacini idrografici della città.

Il comando su QGIS che effettua la ripartizione in più sottobacini con il metodo dei topoieti è "Poligoni di Vorinoi".

In figura 46, si mostrano i 326 sottobacini ottenuti dall'analisi:

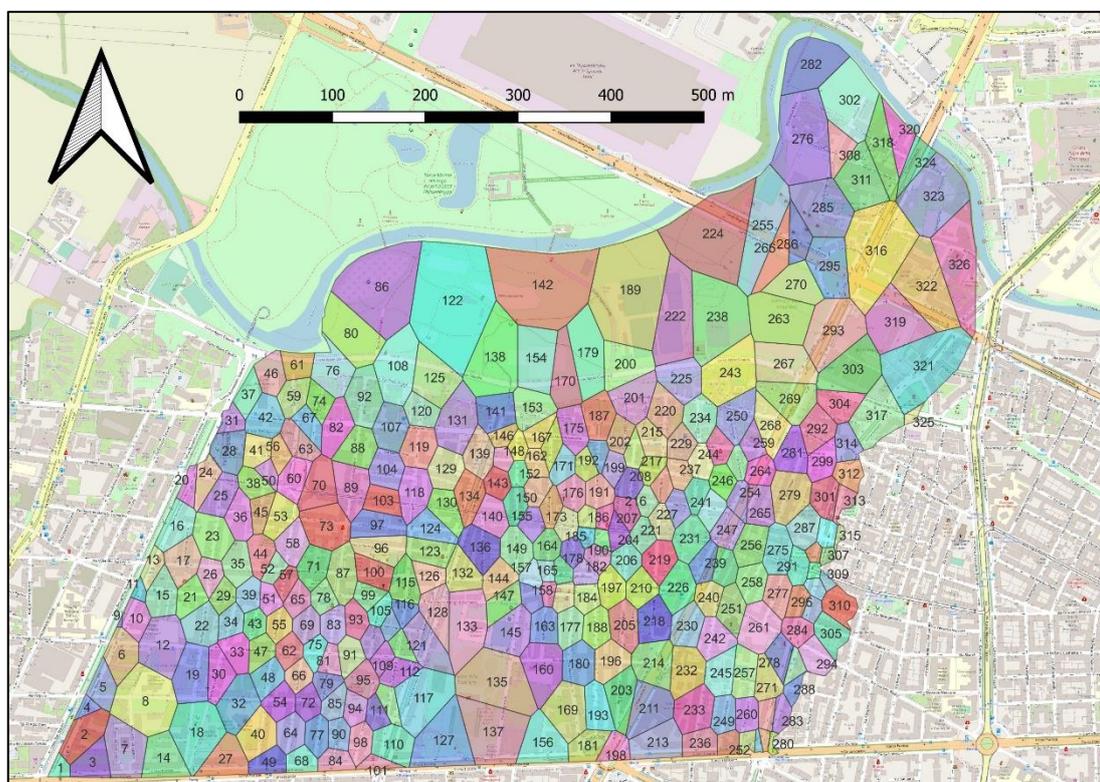


Figura 46: Suddivisione in sottobacini

Essi serviranno, come detto prima, per modellare la rete con il software SWMM, in quanto ad ogni sottobacino va associato un determinato pozzetto, in modo tale da simulare più realisticamente possibile le direzioni di drenaggio dell'acqua durante un evento di pioggia. Ogni sottobacino è caratterizzato da una propria superficie e da una pendenza media.

Si nota che il rapporto tra il numero totale di sottobacini e il numero totale dei pozzetti è circa pari a 3. Questo valore risulta corretto, in quanto per le modellazioni passate effettuate dal DIATI con altri bacini idrografici della città si era giunto ad un numero simile.

3.2.2. *Modello di infiltrazione*

Il metodo adottato per l'infiltrazione nel seguente lavoro è il *Metodo di Horton*. In particolare, secondo la tabella riportata dall'NRCS nel paragrafo 3.1.4. si sono presi in considerazione 3 tipi di suolo:

1. SUOLO TIPO A
2. SUOLO TIPO B
3. SUOLO TIPO C

Il suolo tipo A è stato implementato per le aree verdi del bacino, come ad esempio il Parco della Pellerina, il Parco della Tesoriera o altre piccole zone di verde privato. Così facendo si assume un alto potere di infiltrazione.

Gli altri 2 tipi di suolo sono stati usati per le aree urbanizzate. In particolare, inizialmente è stato utilizzato solo il suolo C. Successivamente nell'analisi di sensitività si è usato il suolo B.

3.2.3. *Calcolo del grado di impermeabilità*

Vettorializzando la carta tecnica del comune da *QGIS*, si ottengono diverse superfici che costituiscono il territorio comunale. A ogni superficie individuata si associano diversi valori di impermeabilità.

Procedendo in questo modo si considera quindi il caso più reale di superfici, come per esempio le strade, che possono essere non completamente impermeabili. Allo stesso modo si ammette che per aree come ampie zone di verde urbano la permeabilità non sia completa, ma esista una zona che non consenta infiltrazione.

Si riporta in figura 47 uno stralcio della carta tecnica comunale vettorializzata.

In tabella 5 sono riportati i valori del grado di impermeabilità di ogni area urbana.



Figura 47: Stralcio della carta tecnica comunale vettorializzata

<i>Impermeabilità [%]</i>	
<i>Edifici</i>	90
<i>Aree agroforestali</i>	20
<i>Aree libere</i>	40
<i>Campi sportivi</i>	30
<i>Piste ciclabili</i>	90
<i>Orografia del terreno (scarpate, ecc..)</i>	30
<i>Strade</i>	90
<i>Marciapiedi</i>	90
<i>Verde Urbano</i>	10
<i>Manufatti</i>	90
<i>Tramvie</i>	90

Tabella 5: Percentuale di impermeabilità per ogni categoria di superficie

Per calcolare la percentuale di impermeabilità di ciascun sottobacino si effettua una media pesata.

$$[\% \text{ impermeabilità}] = \frac{(A_1 \cdot [\%]_i + A_2 \cdot [\%]_i + \dots + A_n \cdot [\%]_i)}{(A_1 + A_2 + \dots + A_n)}$$

3.2.4. *Depression Storage*

Le aree urbane contengono molti tipi di superficie terrestre, che possono essere suddivise in due grandi categorie: superfici permeabili (Pervious), come prati, campi e aree boschive, che consentono alle precipitazioni di penetrare nel terreno, e superfici impermeabili (Impervious), che, ad esempio, non si verificano nei tetti, strade e parcheggi penetrati. Pertanto, SWMM consente a ciascun sottobacino di avere contemporaneamente sottoregioni permeabili. Consente di determinare la quantità totale di sottobacini dedicati a ciascuna tipologia di superficie. Inoltre, non è raro che le superfici impermeabilizzate inizino a generare deflusso quasi immediatamente dopo un evento piovoso, molto prima che le profondità di stoccaggio della depressione si riempiano.

Per simulare questo comportamento, SWMM consente di suddividere ulteriormente l'area di impermeabilizzazione di un sottobacino in due sottoregioni: una per l'acqua stagnante e una per il deflusso. Pertanto, in generale, un sottobacino può contenere tre tipi di sottobande. Si può notare che, secondo queste definizioni, l'intera area di impermeabilizzazione è direttamente collegata al punto di uscita del sottobacino (solitamente uno scarico o canaletta). Il tutto è mostrato in figura 48:

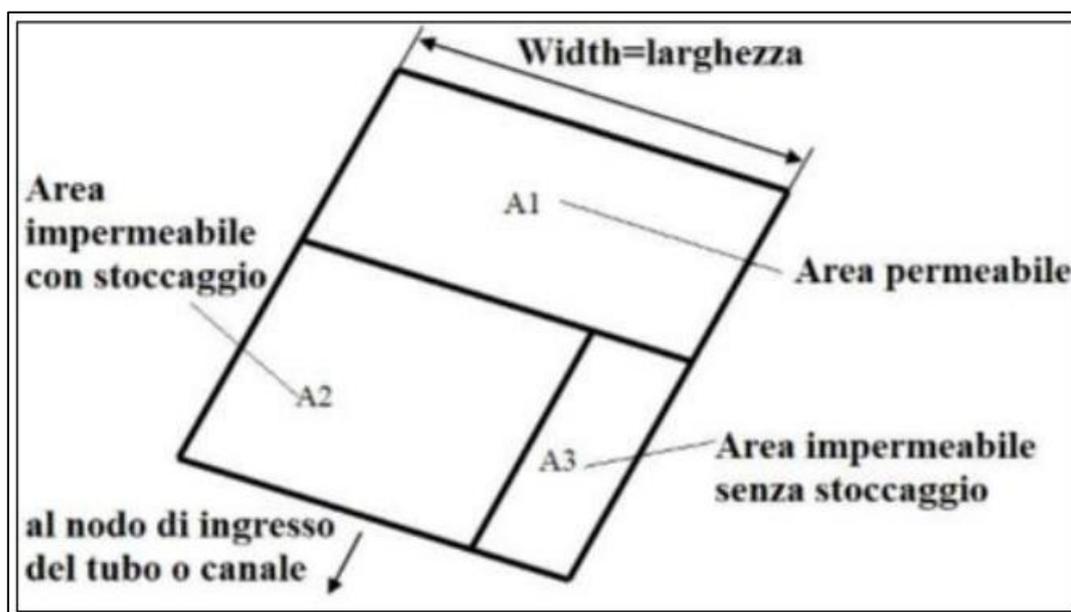


Figura 48: Partizionamento idealizzato del sottobacino per il deflusso superficiale [30]

Queste tre sottoregioni sono incluse in sottobacini idealizzati. Ovviamente, in realtà le tre regioni non sarebbero allineate in questo modo, né sarebbero necessariamente strettamente collegate. La disposizione utilizzata qui è in realtà solo per comodità di modellazione. I simboli A1, A2 e A3 si riferiscono alla zona permeabile e alle due zone impermeabili (rispettivamente con e senza acqua stagnante).

Per il parametro di depression storage sono adottati i seguenti valori [12]:

- Superfici impermeabili: 2 mm
- Superfici permeabili: 5 mm

3.2.5. *Calcolo della larghezza equivalente*

La larghezza equivalente di ogni sottobacino viene stimata a partire dal manuale *SWMM*. Essa è stata stimata come il rapporto tra l'area di ogni sottobacino e la lunghezza di ruscellamento.

La lunghezza di ruscellamento è la massima distanza che la goccia percorre superficialmente prima di entrare in rete.

Sul manuale *SWMM* sono presenti anche altri metodi per stimare la larghezza equivalente, ma si sceglie di usare il metodo sopra descritto in quanto avendo un numero elevato di sottobacini, garantisce il miglior rapporto costi/benefici.

$$Width[m] = \frac{Area\ sottobacino[m^2]}{Lunghezza\ di\ ruscellamento[m]}$$

(3. 8)

3.2.6. Equazioni risolventi

Il modello usato per la simulazione è il *Dynamic Wave* che consiste nella risoluzione completa delle equazioni di De Saint Venant.

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

(3.9)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + g \cdot A \cdot S_f = 0$$

(3.10)

La 3.9 rappresenta l'equazione di continuità.

Dove Q è la portata che all'istante di tempo t defluisce attraverso la sezione d'ascissa curvilinea x , A è la corrispondente sezione idrica, H è il carico idraulico totale della corrente misurato rispetto ad un riferimento orizzontale, g è la costante di accelerazione gravitazionale e S_f è la cadente piezometrica.

Le ipotesi su cui si basano le equazioni di De Saint Venant sono:

- Flusso unidimensionale;
- Pressione idrostatica;
- Il coseno dell'angolo di inclinazione del fondo del collettore è vicino all'unità;

3.2.7. *Tempi di simulazione*

Il tempo di simulazione implementato su *SWMM* è pari a **12 ore**.

È stato scelto questo tempo per simulare correttamente la fase di svuotamento dei collettori.

3.2.8. *Condizioni al contorno*

- CONDIZIONE AL CONTORNO *FREE*

Questo tipo di condizione impone il passaggio dallo stato critico se la corrente è lenta ed è applicabile nel caso di getto libero, ossia sfocio in fiume da una certa altezza o in una condotta di diametro sufficientemente maggiore. È stata usata per lo sfocio in Dora.

- CONDIZIONE AL CONTORNO *NORMAL*

Questo tipo di condizione detta l'imposizione della profondità di moto uniforme ed è stata usata per tutti i troncamenti, ossia per i nodi che confluiscono in altri bacini. È stata usata per la confluenza in altri bacini.

3.3. *Conversione con script Matlab*

Su *SWMM*, la rete fognaria è caratterizzata principalmente da 4 elementi:

1. Collettori
2. Pozzetti
3. Sottobacini
4. Rain Gages (pioggia)

Il problema è però che *SWMM* legge come input un file di testo, caratterizzato dagli elementi sopra citati.

Per importare l'intera rete quindi, si è deciso di utilizzare *Matlab* come strumento di conversione di uno shapefile derivante da *QGIS* e tramite uno script apposito si vuole arrivare a un preciso file di testo leggibile da *SWMM*.

MATLAB (abbreviazione di **Matrix Laboratory**) è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in C.

Gli script sono stati interamente progettati e programmati dall' ing. Federico Raviola.

Esistono due tipologie di script:

- Uno script dedicato a collettori e pozzetti
- Uno script dedicato ai sottobacini

3.3.1. *Script per l'importazione della rete*

Lo script legge in input delle tabelle *Excel*. Esse sono state esportate a priori da *QGIS* in formato "xlsx".

Il codice importa due file:

- Uno chiamato "**condotte**", il quale contiene la lunghezza dei collettori e i materiali costituenti i collettori.
- Uno chiamato "**pozzetti**", il quale contiene la quota di fondo dei collettori e la quota del terreno che proviene dal DTM. Alcuni pozzetti contengono anche le quote di salto.

Inserendo gli ID dei pozzetti nello script, esso genera automaticamente un file leggibile da *SWMM*. Se ci sono delle quote non note (perché magari non sono mai state rilevate da *SMAT*), il codice prosegue con una **interpolazione lineare**.

Lo script lavora con tratti lineari, perché ciò consente di controllare tutto ciò che viene importato e consente di comprendere bene come funziona la rete di drenaggio.

3.3.2. *Script per l'importazione dei sottobacini*

Anche in questo caso lo script legge delle tabelle importate da *QGIS* in formato *Excel*.

Il codice importa quattro file:

- Uno chiamato "**vertici**", il quale contiene le coordinate dei vertici estrapolate per ogni sottobacino.
- Uno chiamato "**lunghezze di ruscellamento**", il quale contiene la lunghezza di drenaggio che descrive verosimilmente la massima distanza che una goccia d'acqua percorre nel sottobacino prima di entrare in rete.
- Uno chiamato "**subcatchment**", il quale contiene la superficie di ogni sottobacino e la pendenza media.
- Uno chiamato "**superfici**", il quale contiene le informazioni derivanti dalla Carta Tecnica Comunale, tra cui: id di ogni diversa categoria di superficie ricadente all'interno dei sottobacini e l'area di ogni elemento.

3.3.3. *Problemi trovati nell'importazione*

Durante l'importazione dei dati da *QGIS* a *SWMM* si sono riscontrati più volte delle criticità, dovute principalmente a:

- I. Quote errate o mancanti dei pozzetti e della loro quota di fondo;
- II. Sezioni mancanti in alcuni collettori;
- III. Sfocio mancante.

Per ogni problema rilevato, si procede ad una risoluzione.

Nel caso del punto I, si è risolto il problema interpolando linearmente le quote dei pozzetti mancanti o errate.

Nel caso del punto II, si risolve il problema assumendo che la sezione incognita del collettore sia uguale a quella dei collettori adiacenti al collettore stesso.

Nel caso del punto III, la *SMAT* ha effettuato dei sopralluoghi riscontrando la presenza di sfoci che mancavano sulla cartografia.

Esempio I: Tratti di Corso Regina Margherita che defluiscono su Corso Svizzera

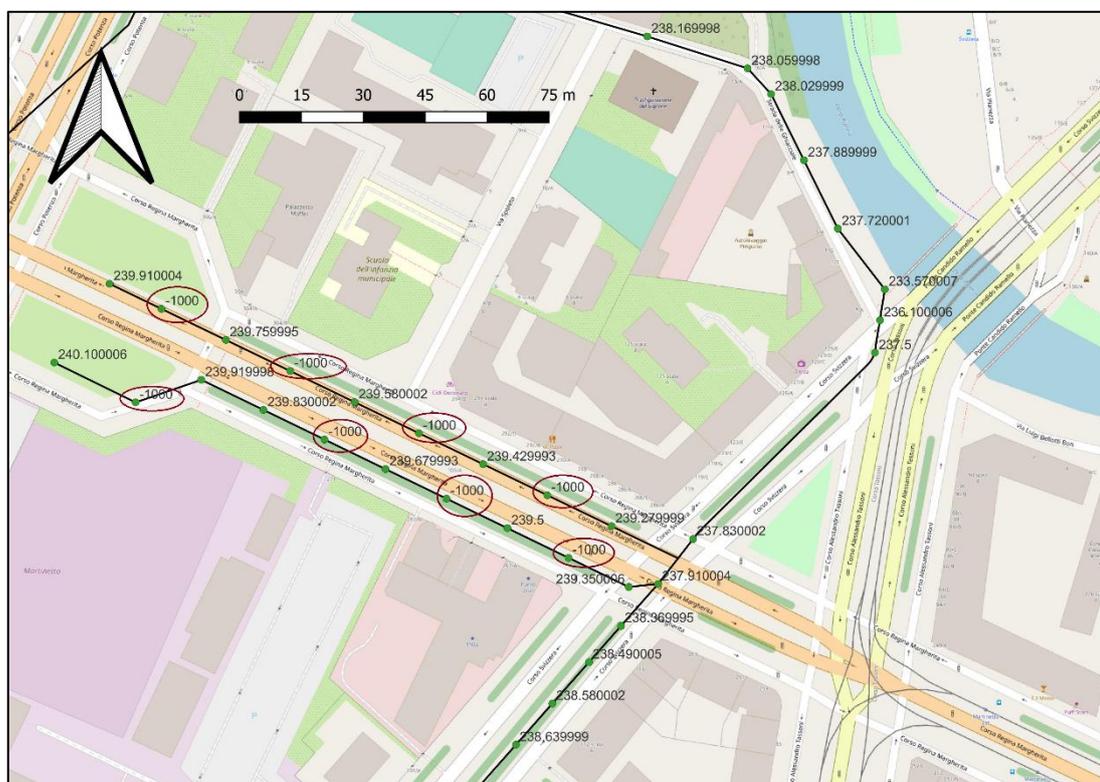


Figura 49: Esempio di quote di fondo dei pozzetti mancanti su Corso Regina Margherita

Soluzione: Interpolazione lineare tra quota del pozzetto a monte e quota del pozzetto a valle, assumendo la stessa pendenza.

In figura 50 si mostrano i valori di pendenza ottenuti per interpolazione lineare.



Figura 50: Pendenze dei collettori, assunte uguali per i pozzetti con quota incognita

Considerato che nel tratto superiore la pendenza tra il primo pozzetto sulla sinistra e il terzo pozzetto è dello 0.29%, si interpola linearmente assumendo la stessa pendenza. Effettuando una similitudine tra triangoli si trova la quota incognita del pozzetto nel mezzo. Lo stesso procedimento si ripete per ogni pozzetto con quota incognita.

Esempio III: Sfocio mancante sulla Dora Riparia tra Corso Svizzera e Strada delle Ghiacciaie

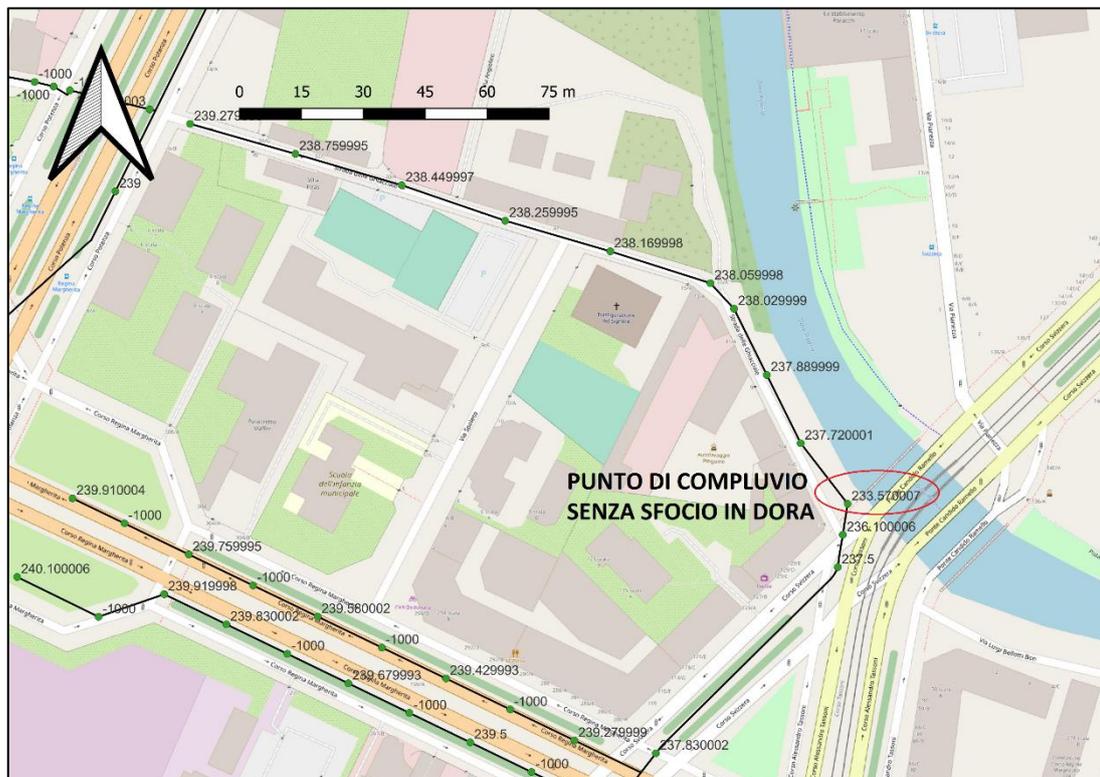


Figura 52: Esempio di sfocio mancante in Dora Riparia

Dalle quote di fondo dei pozzetti si osserva che l'acqua, per gravità, defluisce da Strada delle Ghiacciaie verso sud, mentre da Corso Svizzera l'acqua defluisce verso nord, in direzione Dora Riparia. Ad un certo punto sulla carta appare un punto di compluvio, senza sfocio sul fiume.

Soluzione: Richiesta di una verifica/sopralluogo alla SMAT S.p.A.

Dopo un sopralluogo della SMAT, si è chiarito il perché ci fosse quel punto di compluvio: l'acqua da lì sfocia sul fiume Dora Riparia, con un altro collettore di circa 7 metri, di forma circolare e diametro 2 metri.

3.3.4. *Modello definitivo SWMM*

Si riporta in figura 53 il modello SWMM del bacino.

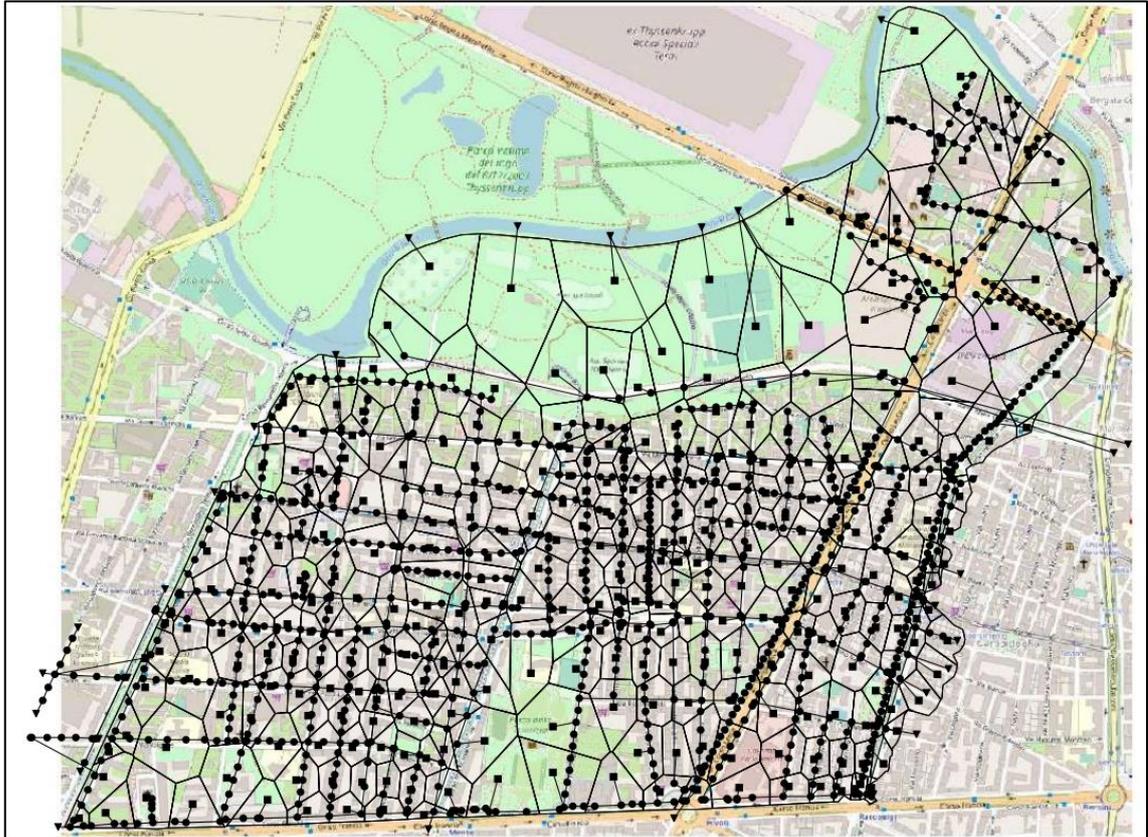


Figura 53: Modello della rete su SWMM

Si possono notare tutti gli elementi caratterizzanti il modello, ossia i collettori, i nodi (pozzetti), i sottobacini e i nodi di outfall.

Capitolo IV

RISULTATI DEL MODELLO

4.1. Simulazione con tempo di pioggia 1h

Per la pioggia di intensità pari a 1 ora, la rete non presenta nessun punto di esondazione e globalmente ha un comportamento idoneo per il deflusso dell'acqua. Si possono già notare comunque una serie di condotte in pressione, come evidenziato in figura 54, al termine dell'evento:

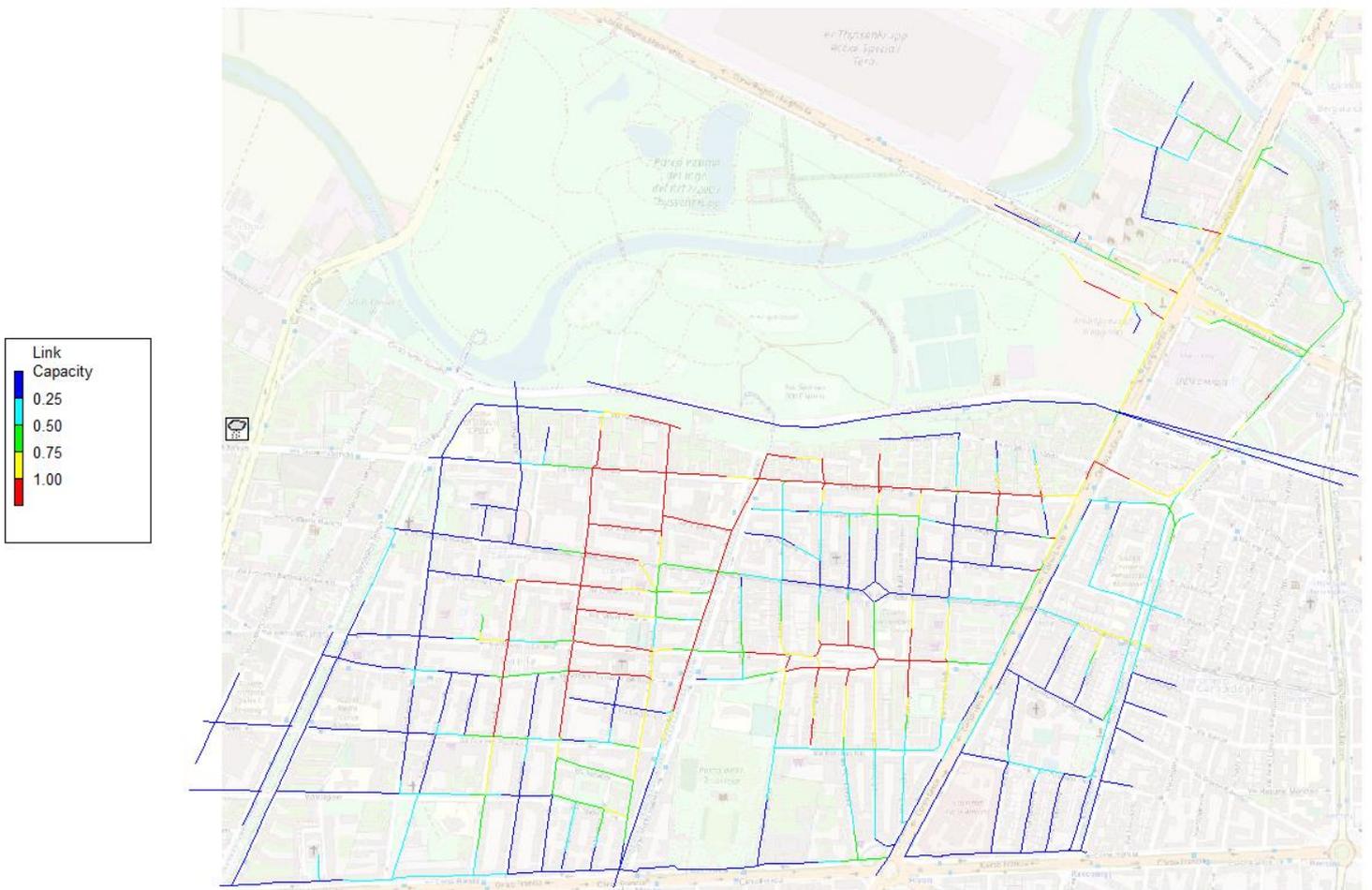


Figura 54: Simulazione della rete con tempo di pioggia 1 ora, con Link Capacity si intende il grado di riempimento del collettore.

4.2. Simulazione con tempo di pioggia 10 minuti

Per la pioggia di intensità pari a 10 minuti, la rete di drenaggio presenta un maggior stato di criticità rispetto al caso precedente, riportando un maggior numero di collettori in pressione e una serie di pozzetti esondati che procureranno un allagamento del piano campagna. Si riporta in figura 55 lo stato della rete al termine dell'evento:

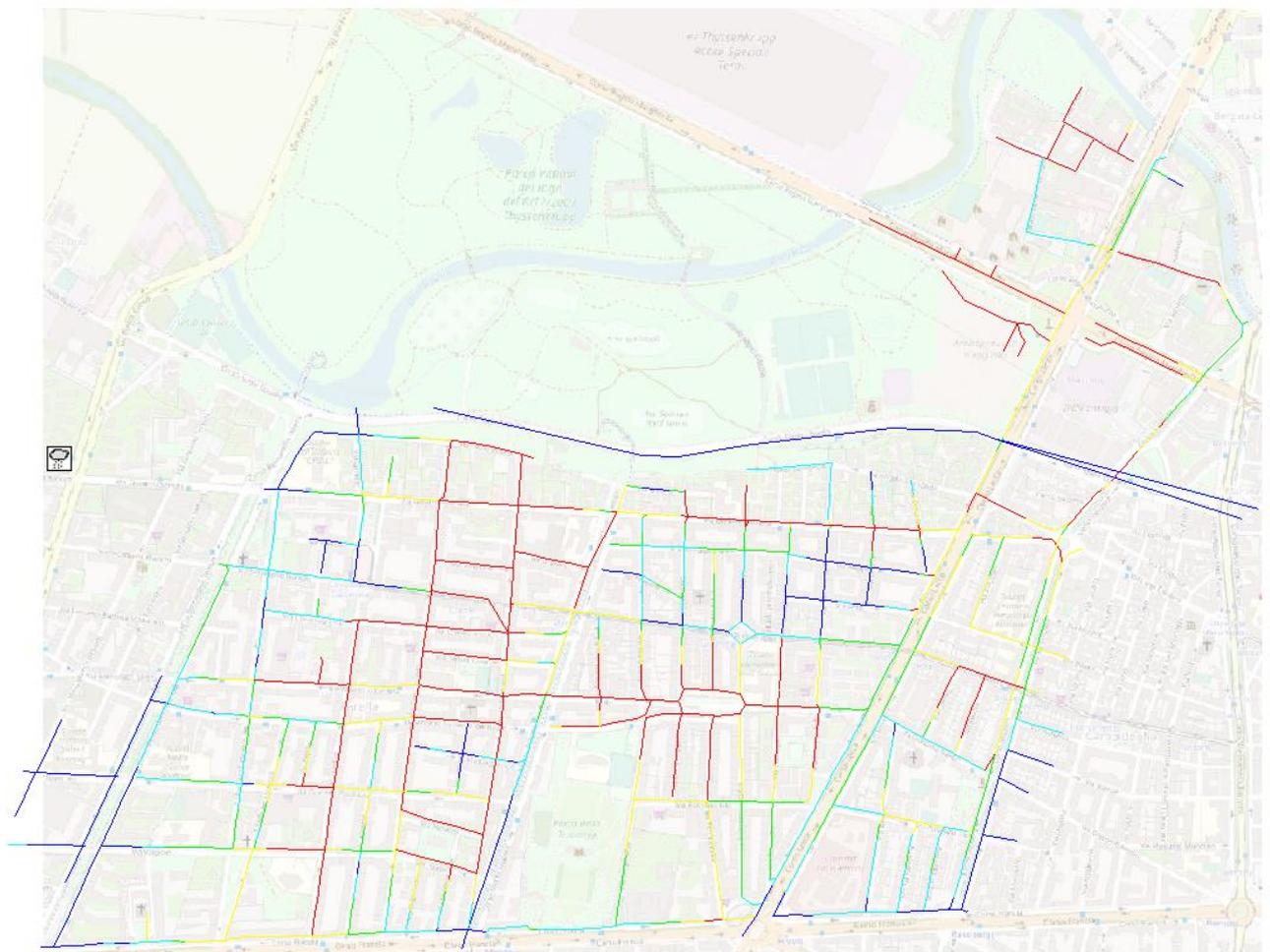


Figura 55: Simulazione della rete con tempo di pioggia 10 minuti

Il volume d'acqua che esonda da ogni pozzetto è riportato in figura 56 nella carta degli allagamenti in m³:

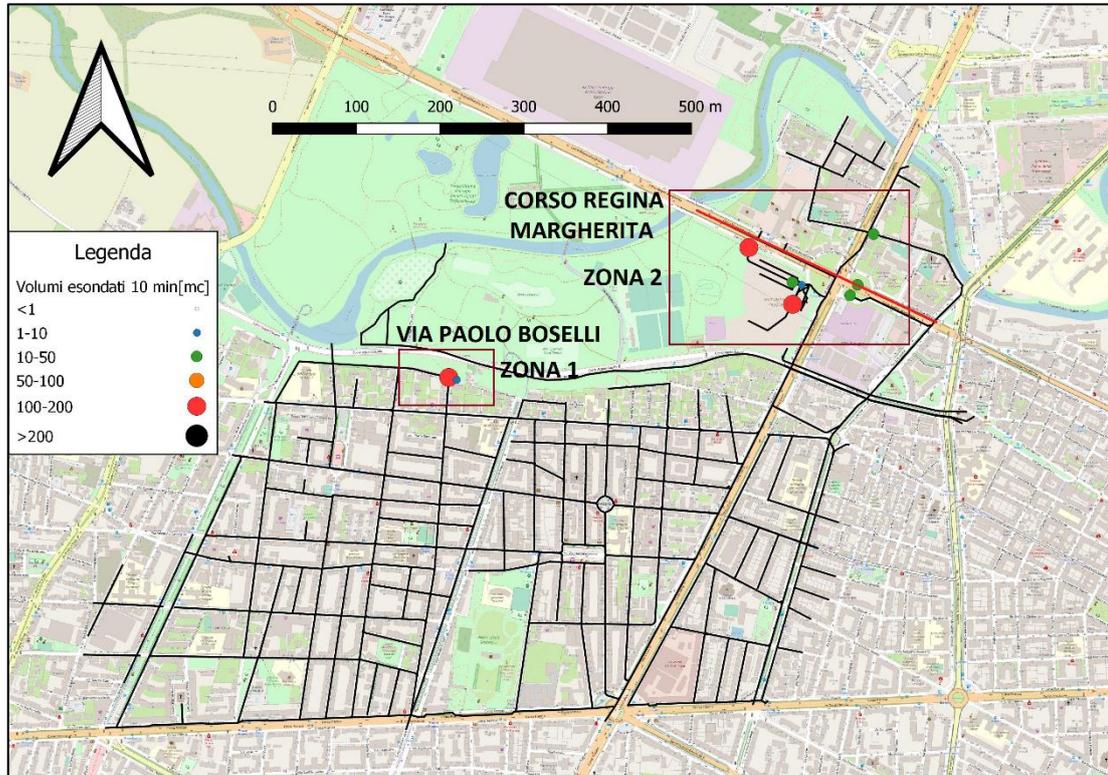


Figura 56: Volumi complessivamente esondati dalla rete nel corso dell'evento di durata 10 minuti

Si osserva che diversi pozzetti esondano proprio nella zona di Corso Regina Margherita, così come proposto nella mappa del rischio idrogeologico del Comune di Torino, il che sta a significare che la simulazione ha un effettivo riscontro con la realtà.

Nelle seguenti pagine, si riporta il profilo longitudinale di alcuni collettori interessati da criticità.

4.2.1. ZONA 1

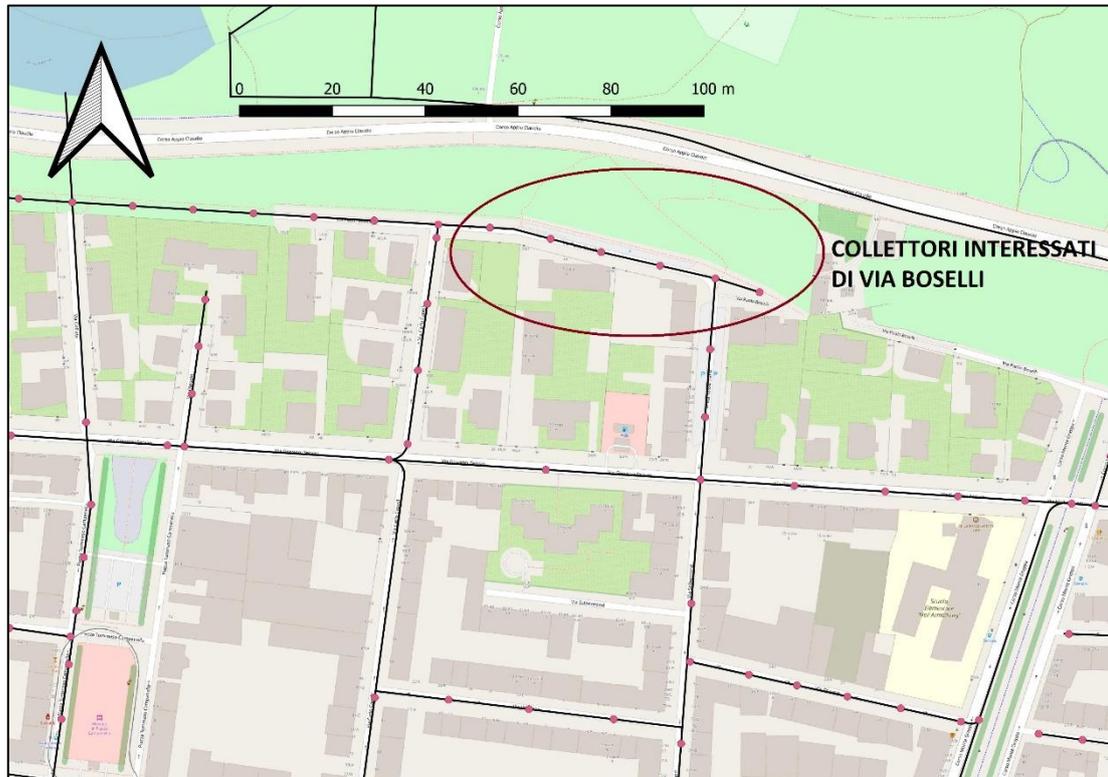


Figura 57: Collettori in pressione di Via Boselli

Si riporta in figura 58 il profilo dei collettori segnati in figura 57.

Il profilo servirà a capire il comportamento del deflusso delle acque in quella zona e sarà utile a definire successivamente una potenziale soluzione al problema dell'esondazione.

- **Via Paolo Boselli**, adiacente a Corso Appio Claudio, all'altezza del civico 19 e 21.

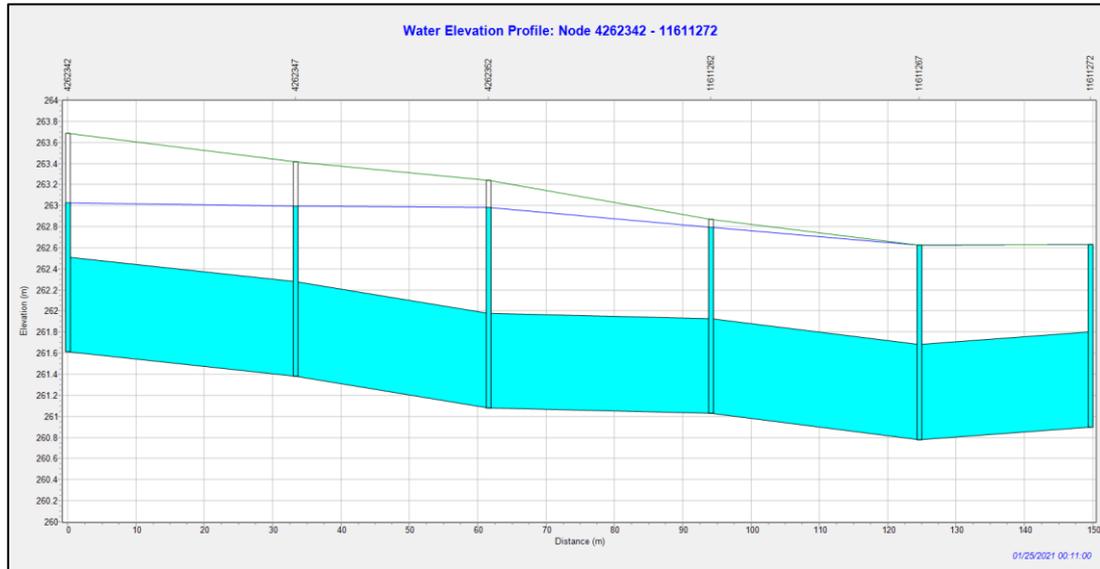


Figura 58: Profilo del collettore di via Paolo Boselli

I collettori in Via Paolo Boselli sono ovoidali 600x900.

Cause dell'esondazione:

- L'acqua va convogliata in Via Salbertrand, ma c'è un punto di compluvio, che nel caso di una pioggia di forte intensità, va a creare problemi (pozzetto 11611267).
- Morfologia ed orografia del territorio, in quanto vi è un abbassamento della quota del piano campagna che comporta una diminuzione dell'altezza del pozzetto e quindi un aiuto all'acqua ad esondare.

4.2.2. ZONA 2

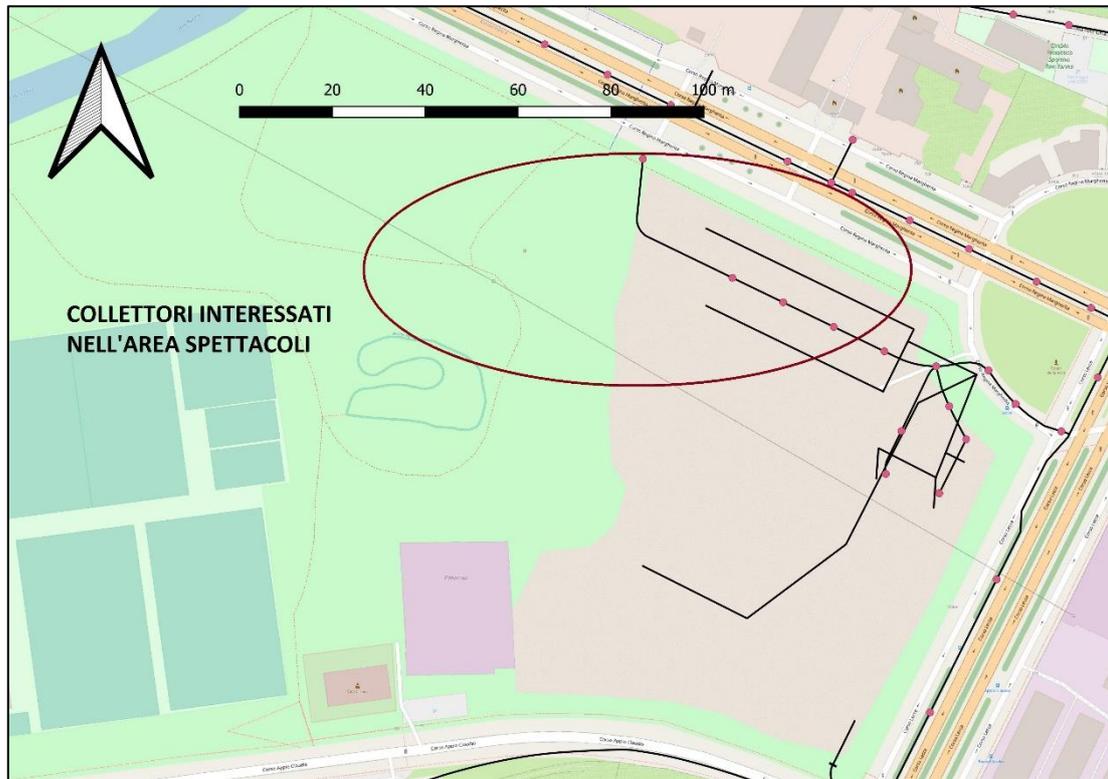


Figura 59: Collettori in pressione nell'area spettacoli viaggianti

Si riporta in figura 60 il profilo dei collettori segnati in figura 59.

- Zona adiacente all'incrocio tra Corso Lecce e Corso Regina Margherita, ossia l'area spettacoli viaggianti.

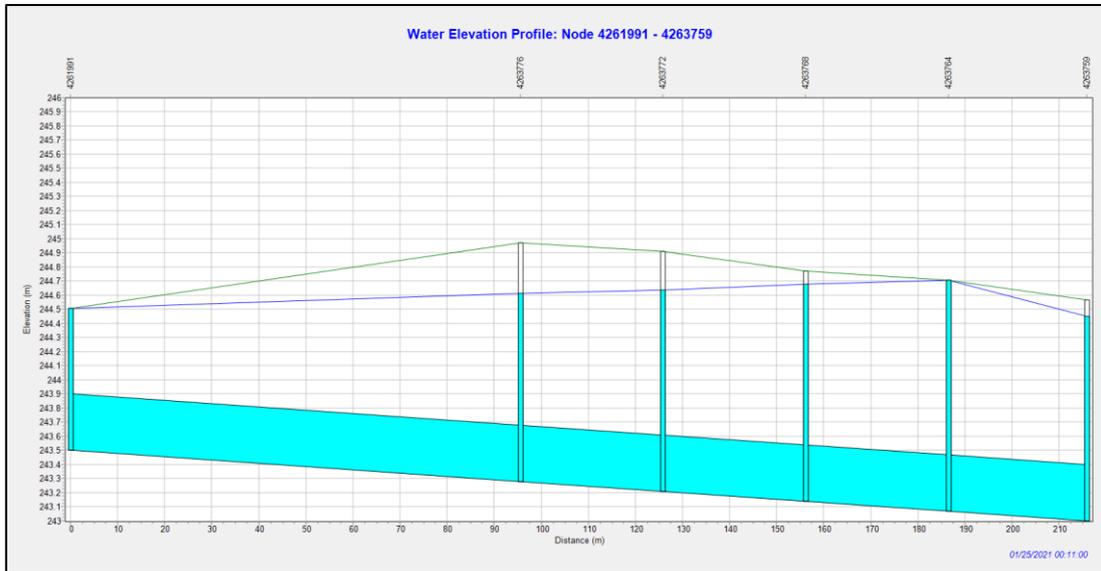


Figura 60: Profilo del collettore dell'area spettacoli viaggianti adiacente a Corso Regina Margherita

I collettori sono circolari, con diametro pari a 40cm nel primo tratto e pari a 50cm nell'ultimo tratto che defluisce su Corso Lecce.

Cause dell'esondazione:

- a) Un non corretto dimensionamento dei collettori. Essi sono sottodimensionati.
- b) Morfologia ed orografia del territorio, in quanto vi è un abbassamento della quota del piano campagna che comporta una diminuzione dell'altezza del pozzetto e quindi un aiuto all'acqua ad esondare.

4.3. *Analisi di sensitività sul modello di infiltrazione*

È stato ritenuto opportuno svolgere una breve analisi di sensitività circa la bontà dei parametri di Horton scelti. Per tutti i bacini è stato quindi aumentato il valore dell'infiltrazione secondo quanto riportato nella tabella sottostante, valutando così la risposta della rete sollecitata dalle due piogge considerate, come di seguito mostrato in tabella 6.

	f₀[mm/h]	f_c[mm/h]	k[1/h]
Valore precedente SUOLO C	125	6.3	2
Valore nuovo SUOLO B	200	12.7	2

Tabella 6: Nuovi parametri di Horton per i sottobacini urbani

Per le aree molto verdi, come ad esempio il Parco della Pellerina o altri parchi/giardini del bacino analizzato, si ipotizza che tutta la pioggia si infiltra e dunque come parametri di Horton sono stati utilizzati i valori del SUOLO TIPO A, riportato in tabella 5:

$f_0 = 250 \text{ mm/h}$;

$f_c = 25.4 \text{ mm/h}$.

4.3.1. Risposta della rete per la pioggia di durata 1h

Si mostra in figura 61 la situazione post-evento:

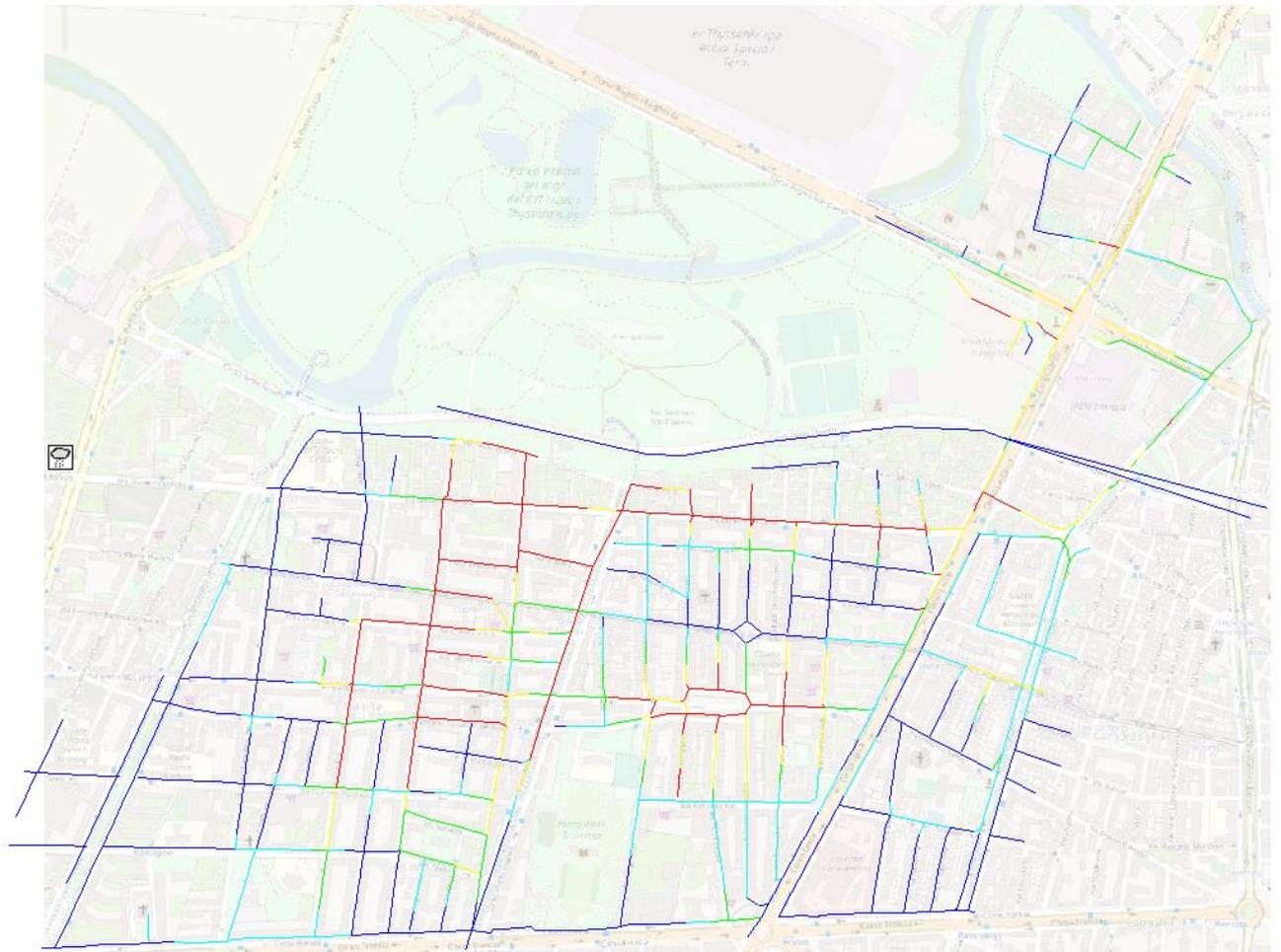


Figura 61: Stato della rete al termine dell'evento di durata 1 ora dopo aver modificato i parametri di Horton

Al termine dell'evento di durata 1 ora lo stato della rete rimane di fatto invariato rispetto al modello con infiltrazione minore. Anche in questo caso, infatti, le aree presentanti tratti in pressione rimangono le medesime, così come la restante parte di rete si presenta in condizioni idonee al deflusso della portata meteorica. Anche in questo caso non si riscontrano punti in cui la piezometrica sovrasti il piano campagna, generando quindi allagamenti.

4.3.2. Risposta della rete per la pioggia di durata 10min

Si mostra in figura 62 la situazione post-evento:

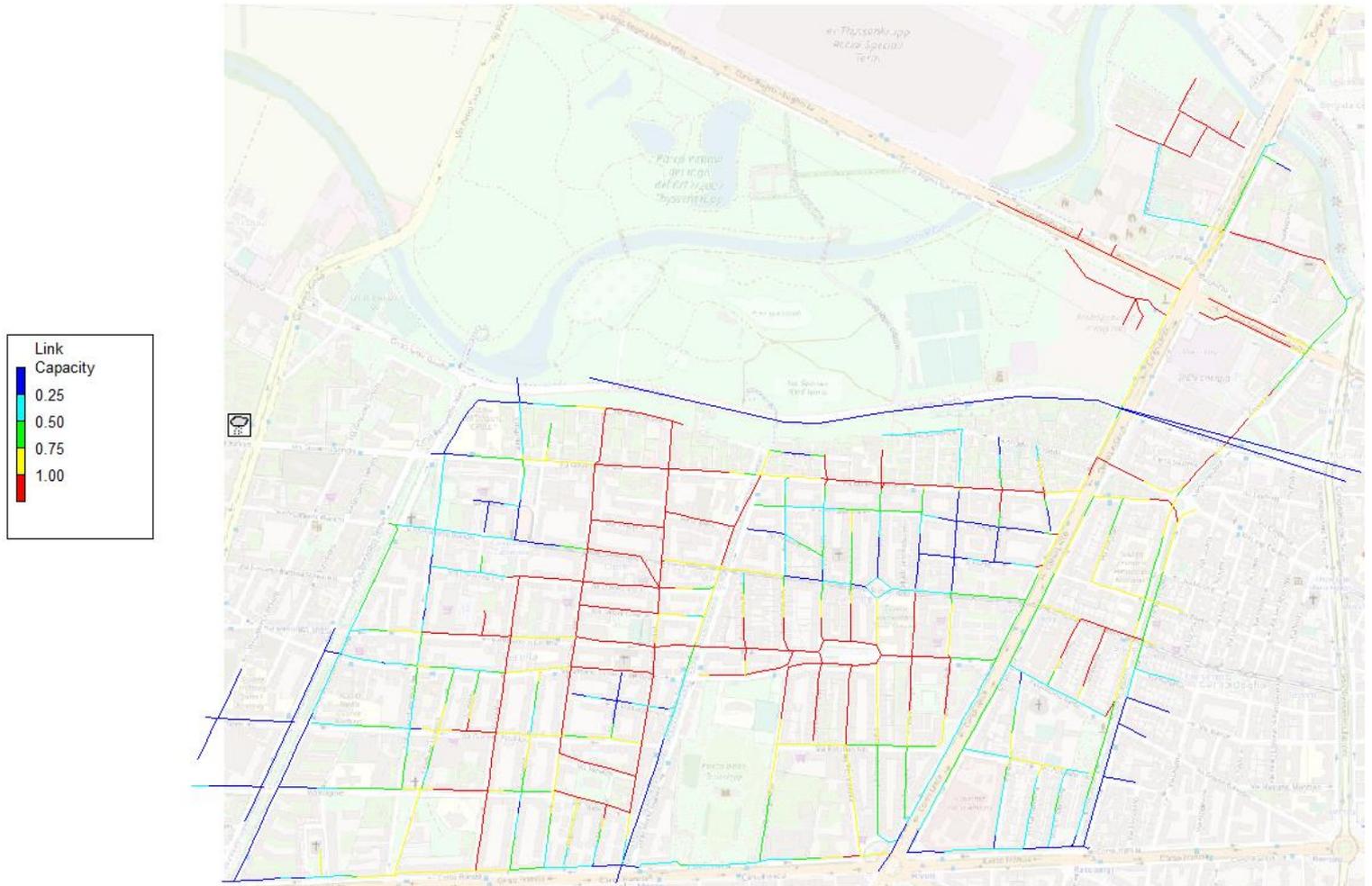


Figura 62: Stato della rete al termine dell'evento di durata 10 minuti dopo aver modificato i parametri di Horton

L'aumento della capacità di infiltrazione dei sottobacini non comporta una variazione sensibile del comportamento idraulico del sistema. Analogamente al caso precedente i tratti che vanno in pressione al termine dell'evento restano i medesimi, così come non cambiano i punti affetti da esondazione.

4.4. Simulazione eventi reali di pioggia

Da metà luglio a metà ottobre 2021 *SMAT* ha avviato una campagna di monitoraggio installando 20 pluviometri e 11 misuratori di portata con lo scopo di calibrare la risposta dei modelli idraulici che si stanno sviluppando. Il bacino modellato confina con la posizione di uno di questi pluviometri (PLUTO_07), pertanto si possono individuare nei dati di pioggia rilevati gli eventi più interessanti (durata di qualche ora o addirittura minuti) e inserirli su *SWMM* per testare come risponde il modello a un evento reale.

Si mostra in figura 63 la posizione del pluviometro:

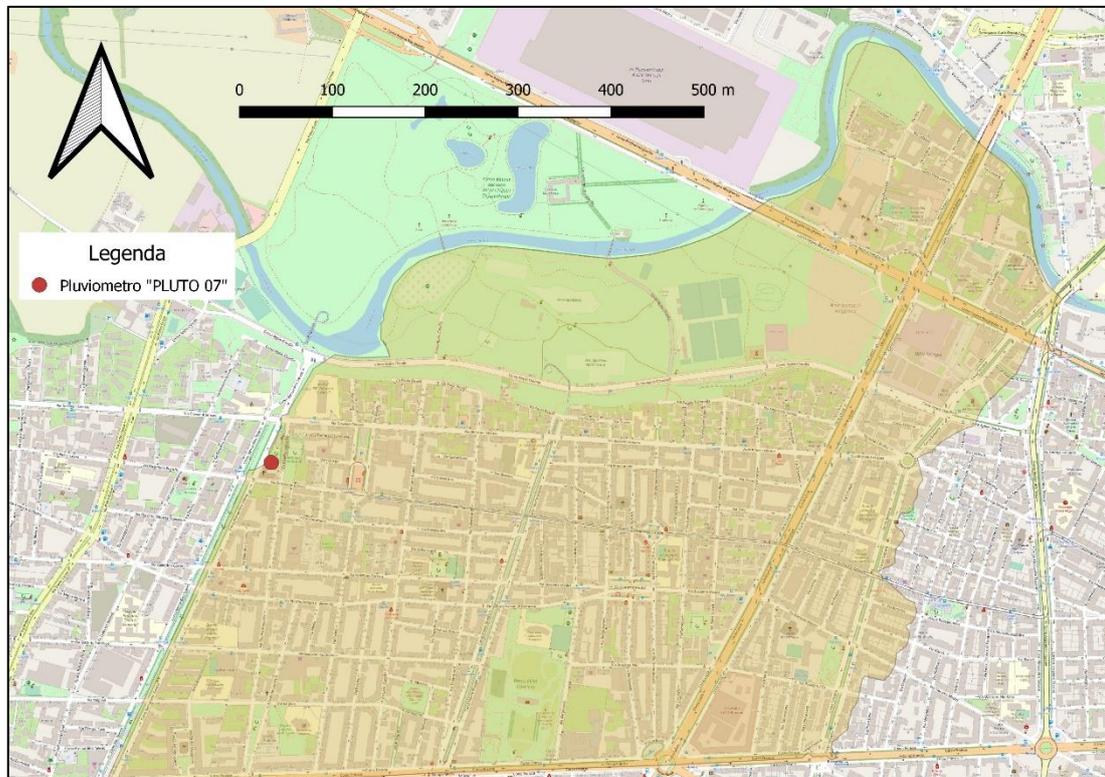


Figura 63: Posizione del pluviometro "PLUTO 07"

I dati del pluviometro sono relativi alle piogge cadute dal 19/07/2021 al 02/11/2021.

Si ritiene opportuno simulare due eventi, che sono stati individuati tra i dati del pluviometro come quelli di maggiore intensità.

4.4.1. Evento del 31/08/2021

4.4.1.1. Precipitazione rilevata

ISTANTE IN CUI IL PLUVIOMETRO RILEVA LA PIOGGIA	INTENSITA' DI PIOGGIA[mm/h]
31/08/2021 03:45	24.8
31/08/2021 04:00	22.4
31/08/2021 04:15	6.4

Tabella 7: Evento registrato dal pluviometro il 31/08/2021

In figura 64 si mostra lo ietogramma corrispondente all'evento del 31/08/2021:

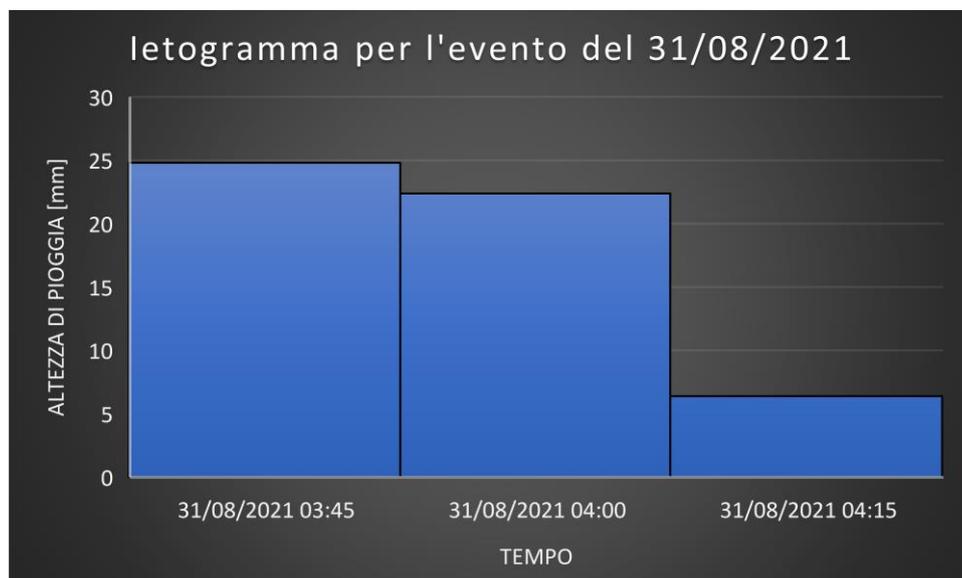


Figura 64: Ietogramma per l'evento del 31/08/2021

4.4.1.2. Risposta della rete

Si mostra in figura 65 la simulazione SWMM al termine dell'evento del 31/08/2021:

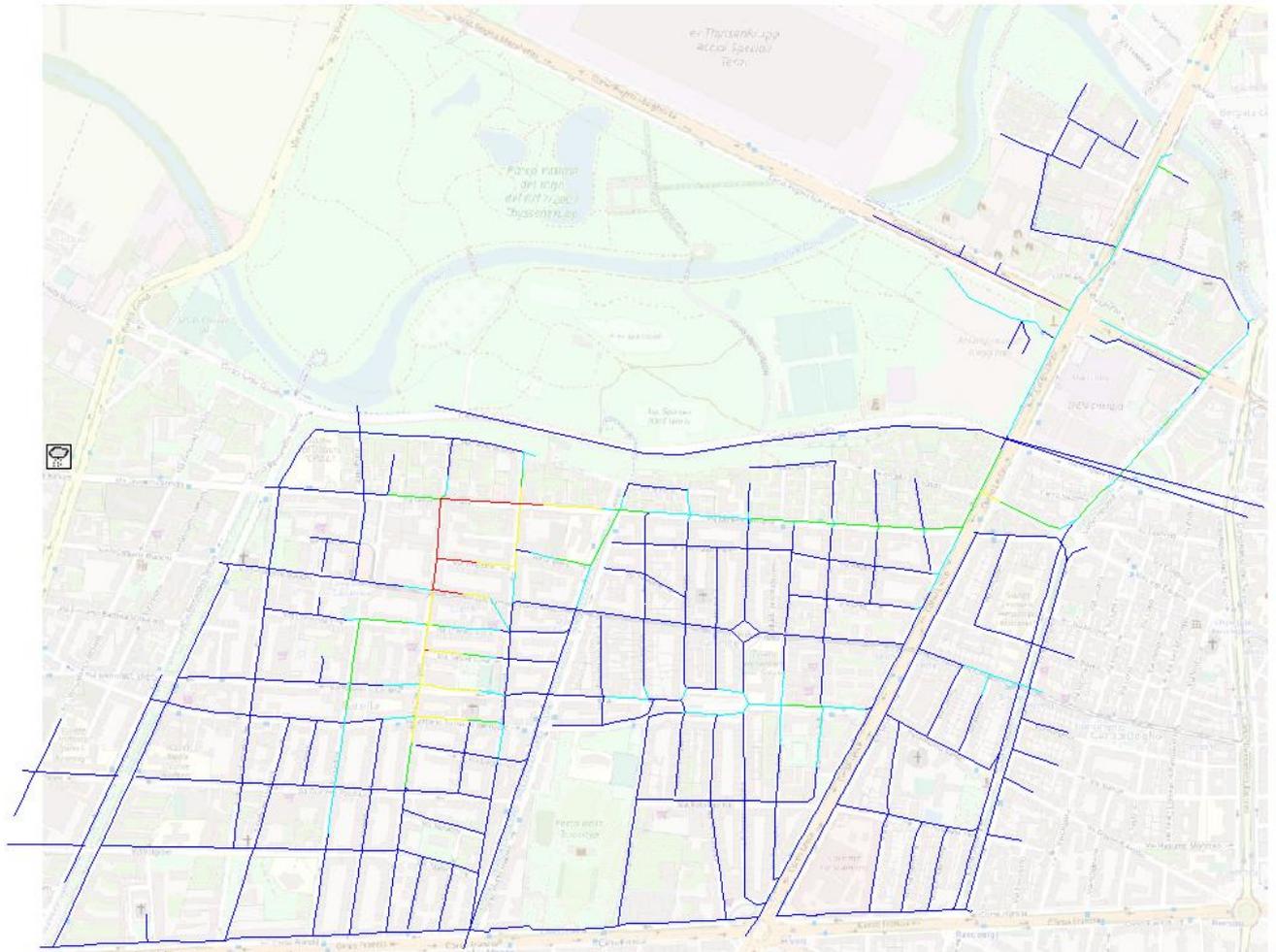


Figura 65: Stato della rete al termine dell'evento del 31/08/2021

La rete risponde idoneamente. La pioggia del 31/08/2021 non procura allagamenti del piano campagna e il grado di riempimento dei collettori è adeguato, in quanto si osservano pochi collettori in pressione, mentre la maggior parte ha un link capacity che varia da 0 a 0.75.

4.4.2. *Evento del 19/09/2021*

4.4.2.1. *Precipitazione rilevata*

ISTANTE IN CUI IL PLUVIOMETRO RILEVA LA PIOGGIA	INTENSITA' DI PIOGGIA[mm/h]
19/09/2021 00:45	0.8
19/09/2021 01:00	27.2
19/09/2021 01:15	69.6
19/09/2021 01:30	52.8
19/09/2021 01:45	1.6

Tabella 8: Evento registrato dal pluviometro il 19/09/2021

L'evento (di circa 1 ora) è molto problematico, in quanto si arriva a punte di intensità di pioggia pari a quasi 70mm/h. In figura 66 si mostra lo ietogramma corrispondente all'evento del 19/09/2021:

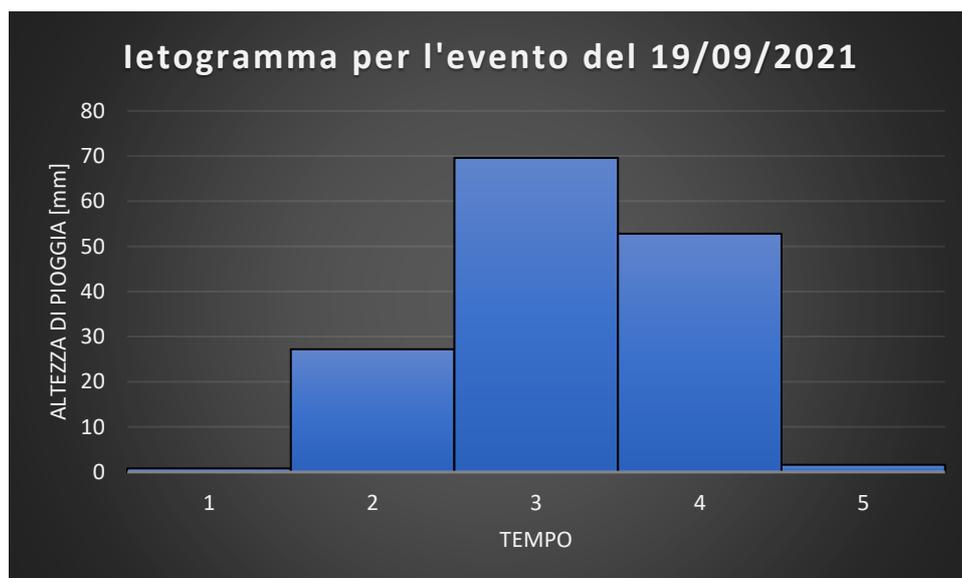


Figura 66: Ietogramma per l'evento del 19/09/2021

4.4.2.2. Risposta della rete

Si mostra in figura 67 come risponde la rete a tale evento.

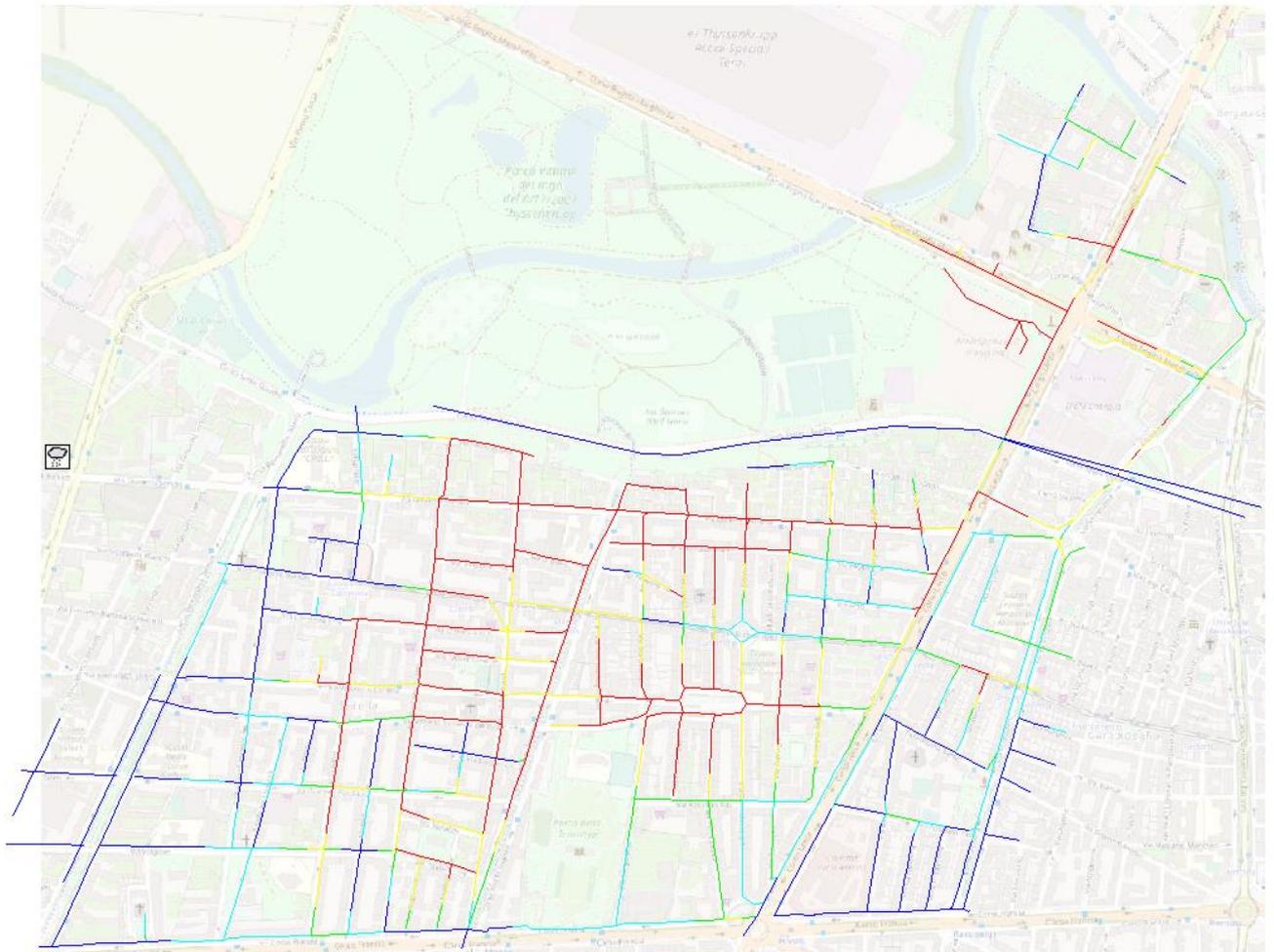


Figura 67: Stato della rete al termine dell'evento del 19/09/2021

Si nota che la rete risponde in modo simile all'evento simulato precedentemente con la pioggia di 10 minuti. Si riporta la carta degli allagamenti in figura 68.

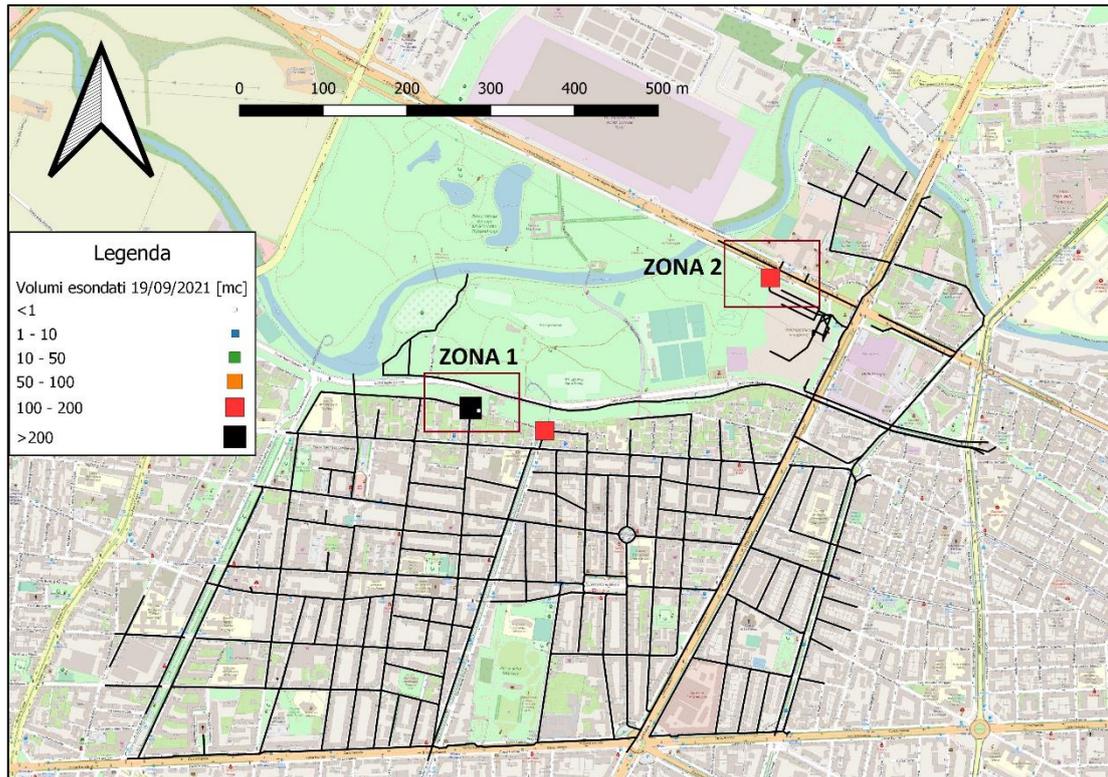


Figura 68: Volumi complessivamente esondati dalla rete nel corso dell'evento del 19/09/2021

Capitolo V

IDENTIFICAZIONE DELLE PROBLEMATICHE E POSSIBILI SOLUZIONI

5.1. *Identificazione punti di intervento*

Per capire quali sono i collettori da sostituire, si osservano dapprima quali sono i pozzetti che esondano e producono un eccessivo allagamento del piano campagna.

In particolare, i collettori sicuramente più critici saranno quelli che producono un allagamento sia nella simulazione con tempo di pioggia 10 minuti che nella simulazione dell'evento reale.

Le aree identificate che saranno oggetto di interventi locali sono 2, come mostrato in figura 69.

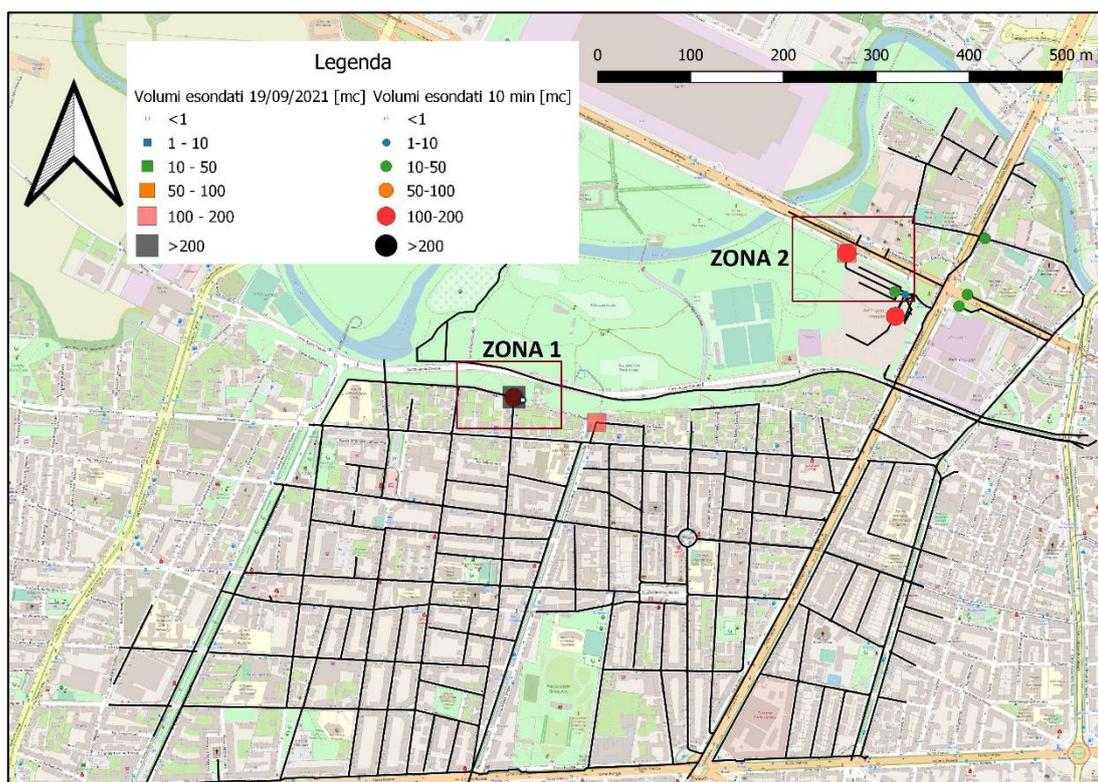


Figura 69: Identificazione dei pozzetti esondati nelle 2 simulazioni

- 1) **ZONA 1:** Incrocio tra via Paolo Boselli e via Salbertrand.
- 2) **ZONA 2:** Area spettacoli viaggianti, adiacente a Corso Regina Margherita.

Gli interventi si effettueranno soddisfacendo un grado di riempimento (link capacity) pari ad un valore che si attesta dal 50 al 70%.

5.2. *Pioggia di progetto*

Le soluzioni che sono state adottate in questo tipo di lavoro sono prettamente geometriche, ossia si va ad intervenire direttamente incrementando la sezione dei collettori, trovando comunque un giusto compromesso tra costi e benefici.

Da notare che, essendo in fase di intervento sulla rete, si aumenta il tempo di ritorno da 5 anni a 10 anni per la pioggia di 10 minuti, questo perché aumentando il tempo di ritorno, aumenta l'efficacia dell'intervento stesso.

Ritornando all'*Atlante delle piogge intense* si valuta la nuova intensità di pioggia, pari a 169.5 mm/h, come di seguito riportato in figura 70:

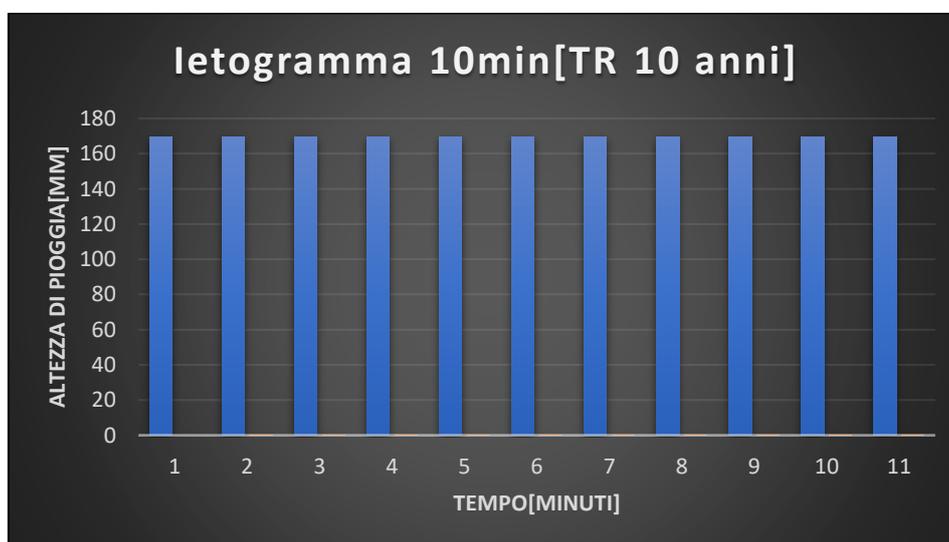


Figura 70: Ietogramma costante per pioggia di durata 10 minuti con TR 10 anni

Si mostra in figura 71 una carta degli allagamenti relativa al TR 10 anni.

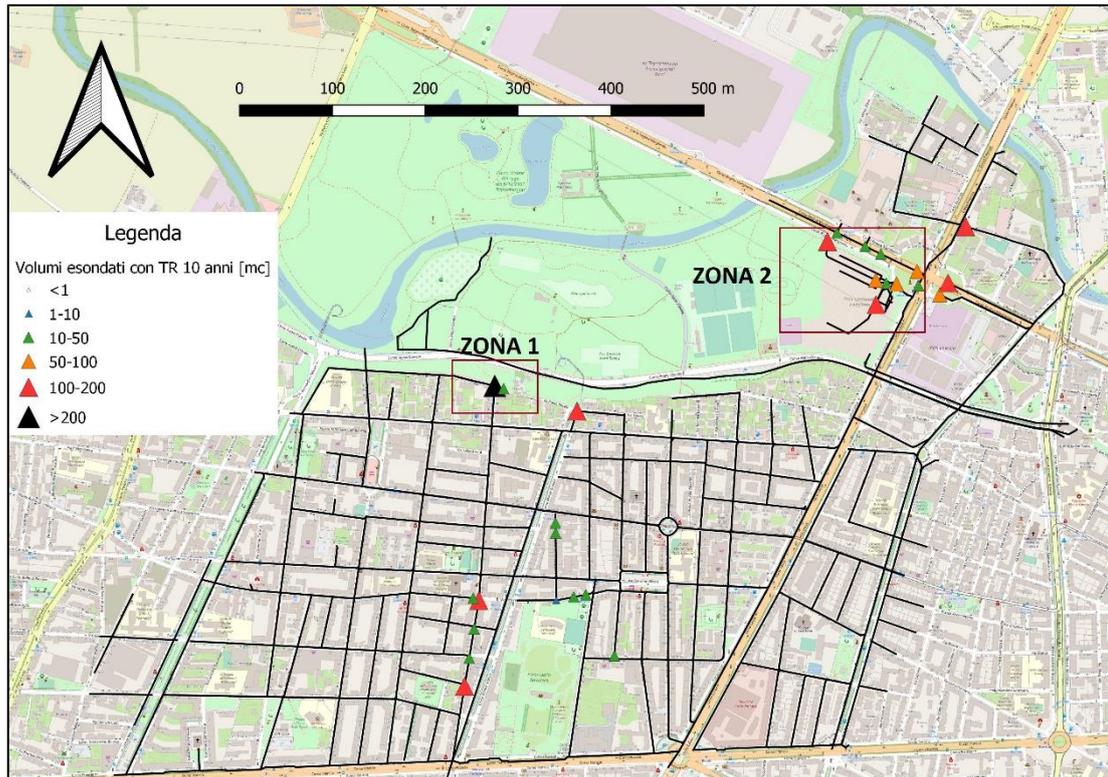


Figura 71: Carta degli allagamenti relativa al TR 10 anni

La situazione è peggiorata, con picchi di volumi esondati maggiori di 200 m³.

5.3. Possibili interventi

5.3.1. Interventi in zona 2 – Area Spettacoli

5.3.1.1. Situazione pre - intervento

Nella ZONA 2 sono presenti collettori circolari di 40cm sulla sinistra e 3 collettori di 50cm che poi confluiscono in Corso Lecce.

Si tratta di un'area compresa tra Corso Appio Claudio, Corso Regina Margherita e Corso Lecce adibita a spettacoli generali quali circo, giostre.

I collettori presenti in quest'area, quando sollecitati da precipitazioni intense, vanno tutti in pressione, come mostrato in figura 72:



Figura 72: Situazione pre - intervento nell'area spettacoli

5.3.1.2. *Situazione post - intervento*

Possibile soluzione:

La soluzione più semplice, ma al tempo stesso la più efficace sia dal punto di vista idraulico che dal punto di vista economico è quella di andare ad aumentare la sezione dei collettori. Si individuano dei collettori circolari, sempre in calcestruzzo, di diametro pari a 80cm, che saranno messi per tutta l'area spettacoli viaggianti e 5 collettori di diametro 1m fino alla confluenza di Corso Lecce. Il risultato è mostrato in figura 73:



Figura 73: Risposta della rete in ZONA 2 dopo la sostituzione dei collettori

Si nota un netto miglioramento. Non si hanno più aree allagate del piano campagna e il grado di riempimento soddisfa i requisiti minimi.

In figura 74 si mostra il profilo dei collettori post - intervento.

IDENTIFICAZIONE DELLE PROBLEMATICHE E POSSIBILI SOLUZIONI

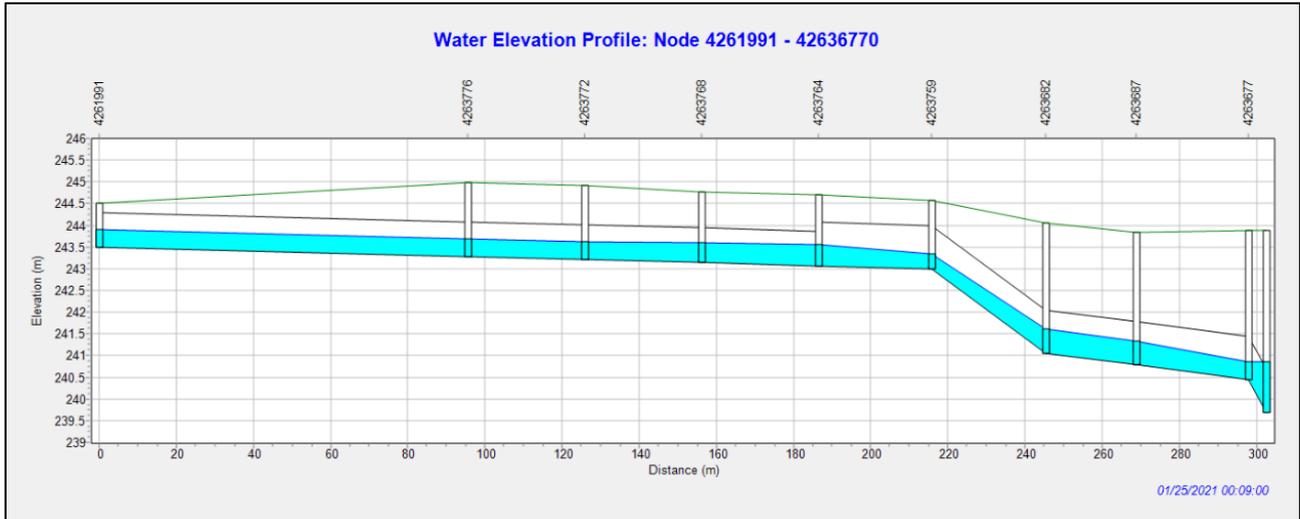


Figura 74: Profilo dei collettori nell'area spettacoli post - interventi

Il profilo sopra riportato rappresenta l'intero tratto soggetto ad intervento.

I collettori interessati hanno un grado di riempimento che varia dal 50 al 75%.

5.3.2. *Interventi in zona 1 – Via Boselli*

5.3.2.1. *Situazione pre - intervento*

In ZONA 1 è presente un punto di compluvio in via Boselli che provoca un punto di esondazione proprio all'incrocio con via Salbertand. I collettori sono ovoidali con sezione 700x1200mm.

In figura 75 si riporta la situazione in caso di precipitazioni intense:



Figura 75: Situazione pre – intervento in Via Boselli

Si nota che i collettori sono tutti in pressione, mentre il Canale della Pellerina è poco sollecitato, per questo si adotta una soluzione diversa dalla solita sostituzione dei collettori.

5.3.2.2. *Situazione post - intervento*

Possibile soluzione:

Si opta per un tipo di intervento un po' più impattante, sia dal punto di vista idraulico che dal punto di vista morfologico. Si decide di non cambiare la geometria dei collettori attuali, ma si vuole sfruttare il canale della Pellerina, creando un nuovo collettore circolare di diametro 1m che fa da *bypass*. Il punto di esondazione dista circa 70m dal canale, che si trova a quota più depressa, in Corso Appio Claudio. Tra via Boselli e il canale della Pellerina è presente una scarpata. In figura 76 e 77 si mostra il potenziale *bypass*.

IDENTIFICAZIONE DELLE PROBLEMATICHE E POSSIBILI SOLUZIONI

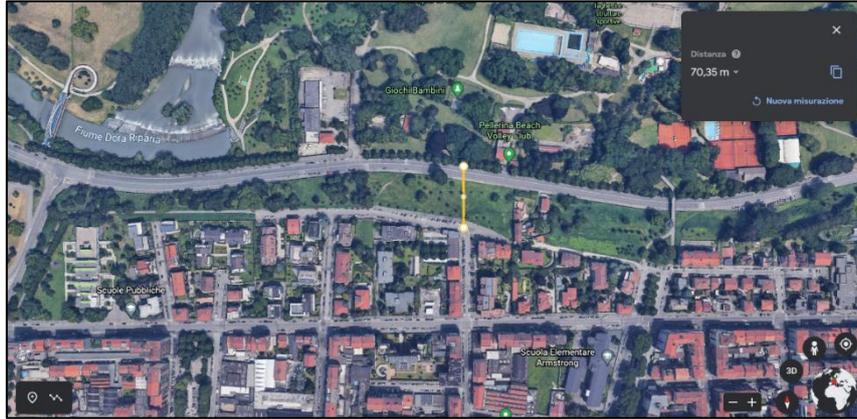


Figura 76: Planimetria dell'area soggetta ad intervento. In giallo, il possibile bypass fognario



Figura 77: Area di Corso Appio Claudio potenzialmente interessata dall'intervento

Il risultato della simulazione su SWMM è il seguente, mostrato in figura 78:



Figura 78: Risposta della rete in ZONA 1 dopo l'introduzione del collettore

Si nota che la situazione in corrispondenza del precedente punto di esondazione è visibilmente migliorata. Non si hanno più allagamenti del piano campagna e il grado di riempimento dei collettori soddisfa i requisiti minimi, anche se una serie di collettori di via Boselli rimangono in pressione, ma comunque non provocando esondazioni. Il canale della Pellerina risulta più sollecitato rispetto a prima, ma comunque in linea con quanto previsto.

Si riporta il profilo del nuovo *bypass* in figura 79:

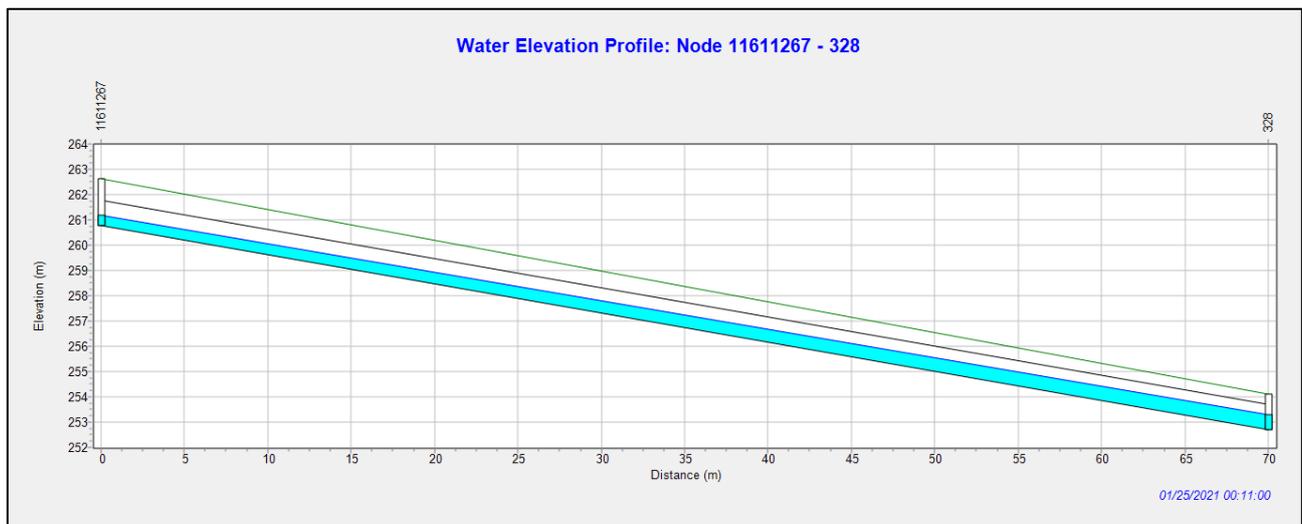


Figura 79: Profilo del nuovo *bypass* che collega Via Boselli con il Canale della Pellerina

5.3.3. Considerazioni finali

Per realizzare una simulazione realistica, è indispensabile ottenere un modello che provveda a fornire dei risultati quanto più vicini agli eventi naturali osservati. Tale operazione è comunemente definita calibrazione o taratura del modello. Con il processo di calibrazione si ricercano i valori dei parametri che assicurano una buona corrispondenza tra i livelli, oppure le portate simulate dal modello e quelle registrate dal misuratore, con riferimento a un preciso evento di precipitazione.

Il seguente modello non ha subito il processo di calibrazione in quanto non è presente un misuratore di portata all'interno del bacino, per cui i valori di tutti i parametri necessari a descrivere il modello sono stati presi in modo tabellare, ma è stato comunque in grado di prevedere correttamente zone note per essere oggetto di allagamenti.

Conclusioni

La simulazione effettuata per il bacino in questione, con il software *SWMM*, ha riscontrato una discreta affidabilità, evidenziando la suscettibilità del bacino a subire allagamenti, così come redatto dal Piano di Protezione Civile.

I punti critici che provocano esondazioni nel modello *SWMM* con le piogge di progetto derivanti dall'*Atlante delle piogge intense* (in particolare la pioggia di durata 10 minuti con una distribuzione di Gumbel e un tempo di ritorno pari a 5 anni) confermano quanto detto.

La pioggia di durata pari a 1 ora provoca invece una serie di collettori in pressione, ma non allagamenti del piano campagna, per cui la rete risponde idoneamente ad un evento del genere.

I pozzetti che esondano (secondo il modello) con una pioggia di durata 10 minuti coincidono con i pozzetti esondati nella simulazione per un evento di pioggia reale (in particolare per l'evento del 19/09/2021). Ciò è un buon indice di bontà del modello.

Altra informazione ritenuta importante per l'affidabilità del modello è la presenza di notizie sui giornali/web/social network, che ha effettivamente confermato il risultato derivante dalla simulazione [31], [32], [33], [34], [35].

Le problematiche della rete di drenaggio urbano sono dovute principalmente al fatto che i collettori non sono compatibili con le condizioni di deflusso del sistema.

Sicuramente, una pioggia di breve durata mette in seria difficoltà il sistema di drenaggio urbano del bacino idrografico analizzato, provocando allagamenti del piano campagna e una serie di collettori che vanno in pressione.

Gli interventi proposti hanno avuto come obiettivo quello di migliorare il deflusso delle acque, soprattutto nei punti ritenuti critici, attraverso la sostituzione dei collettori attualmente presenti con altri collettori di diametro maggiore nell'area spettacoli viaggianti e l'installazione di un nuovo collettore (bypass) che defluisce nel Canale della Pellerina, proveniente da Via Boselli.

La situazione è decisamente migliorata, sia perché non esondano più pozzetti con le piogge di brevissima durata e sia perché tali collettori non vanno più in pressione.

Nonostante il modello non sia stato calibrato, il presente lavoro di tesi è un ottimo punto di partenza per lo studio del bacino analizzato, in quanto i punti esondati dal modello, coincidono con la zona ad alto rischio allagamenti redatta dal Piano di Protezione Civile per la città di Torino.

I risultati di questo lavoro potranno costituire la base conoscitiva per futuri interventi sulla rete fognaria bianca nel bacino analizzato. Naturalmente, qualora fossero disponibili dati aggiuntivi, ulteriori studi potranno essere condotti partendo da questo lavoro di tesi per raffinare i risultati e migliorarne l'affidabilità.

Bibliografia e sitografia

- [1] AfmaFognatureromane. (s.d.). Tratto da <http://www.afmafognatureromane.it/edilizia-impianti-di-fognature/>.
- [2] Baratti, I. E. (2009). Tratto da https://amslaurea.unibo.it/1029/1/Baratti_Emanuele_Tesi.pdf.
- [3] Ing. Bruno, I. R. (2007). Tratto da <https://guariso.faculty.polimi.it/appunti/software/modelli/SWMM.pdf>.
- [4] consulenzatecnicadiparte. (s.d.). Tratto da <https://consulenzatecnicadiparte.it/perizia-per-danni-da-rigurgito-fognario/>.
- [5] Dicatechpoliba. (s.d.). Tratto da https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/239/costr.%20Idrauliche/19_metodo_INVASO.pdf.
- [6] DocentiUniNa. (s.d.). Tratto da <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/672612>.
- [7] EdilTecnico. (s.d.). Tratto da <https://www.ediltecnico.it/56636/fognature-in-pvc-progettazione-realizzazione/>.
- [8] FitoDepurazionevis. (s.d.). Tratto da <http://www.fitodepurazionevis.it/evapotraspirazione-totale-con-scariconullo/>.
- [9] Manuale del geologo, M. d. (s.d.). Tratto da <https://manualedelgeologo.it/la-precipitazione/>.
- [10] Gradiron. (s.d.). Tratto da <http://www.gridiron.it/ita/vetrina/caditoie-1-17.php>.
- [11] InfoBuild. (s.d.). Tratto da <https://www.infobuild.it/approfondimenti/sistemi-di-drenaggio-alveolari-dimensionamento-idraulico/>.
- [12] Marchetta, I. (s.d.). Tratto da *Validazione del modello idraulico in SWMM della rete di drenaggio di Torino nel rione Borgo Dora*.
- [13] Padova, U. d. (s.d.). Tratto da https://elearning.unipd.it/scuolaamv/pluginfile.php/17696/mod_resource/content/1/07_Modelli%20digitali%20del%20terreno_2014.pdf.
- [14] Piemonte, A. (s.d.). Tratto da http://webgis.arpa.piemonte.it/atlante_pioggia_webapp/.

- [15] Quantitative-probabilitydistribution. (s.d.). Tratto da <https://quantitative-probabilitydistribution.blogspot.com/2020/10/difference-between-prospect-and.html>.
- [16] Ing. Rigon, I. R. (s.d.).
- [17] Ing. Saba, I. A. (s.d.). Tratto da https://www.unica.it/static/resources/cms/documents/C03Dimensionamento_fognaturabianca.pdf.
- [18] Srl, F. U. (s.d.). Tratto da <https://www.fantuzugo.it/catalogo/manufatti-da-costruzione/tubi.html>.
- [19] SWMM, E. (2015). Tratto da <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.
- [20] Torino, P. c. (s.d.). Tratto da <http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/protezione-civile/prevenzione-pianificazione/cartografie-pppp>.
- [21] Unito. (s.d.). Tratto da <https://www.topps.unito.it/index.php/ruscellamento>.
- [22] Vittoplast. (s.d.). Tratto da <http://www.vittoplast.it/tubi-raccordi-fognatura.html>.
- [23] Wikipedia. (s.d.). Tratto da https://it.wikipedia.org/wiki/Parco_della_Pellerina.
- [24] Wikipedia. (s.d.). Tratto da [https://it.wikipedia.org/wiki/Infiltrazione_\(idrologia\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Infiltrazione_(idrologia)).
- [25] Da Deppo L., Datei C. (2009), Fognature, Libreria Internazionale Cortina Padova
- [26] Citrini, Nosedà (1987), Idraulica, CEA
- [27] Boano, Raviola, Ridolfi, Vesipa, Scibetta, Modellazione idraulica della rete di drenaggio urbano della città di Torino – Area Vachiglia/Vanchiglietta
- [28] Gradiron, Classificazione secondo le norme UNI EN 1433:2008
- [29] <https://www.icanaliditorino.it/il-canale-della-pellerina>
- [30] MANUALE SWMM, <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm-version-51-users-manual>
- [31] <https://www.torinoggi.it/2021/06/07/leggi-notizia/argomenti/cronaca-11/articolo/pochi-millimetri-di-pioggia-bastano-per-allagare-alcune-strade-a-torino.html>

[32] <https://www.torinoggi.it/2020/08/19/leggi-notizia/argomenti/attualita-8/articolo/strade-cantine-e-garage-allagati-situazione-critica-nella-zona-ovest-di-torino-dopo-il-forte-tempo.html>

[33] <https://www.fanpage.it/attualita/maltempo-in-piemonte-bomba-dacqua-su-cuneo-blackout-e-strade-allagate/>

[34] <https://www.torinotoday.it/video/via-servais-caditoie-otturate.html>

[35] <https://www.quotidianopiemontese.it/2020/08/17/violento-nubifragio-a-torino-colpite-soprattutto-le-zone-a-nord-della-citta/>